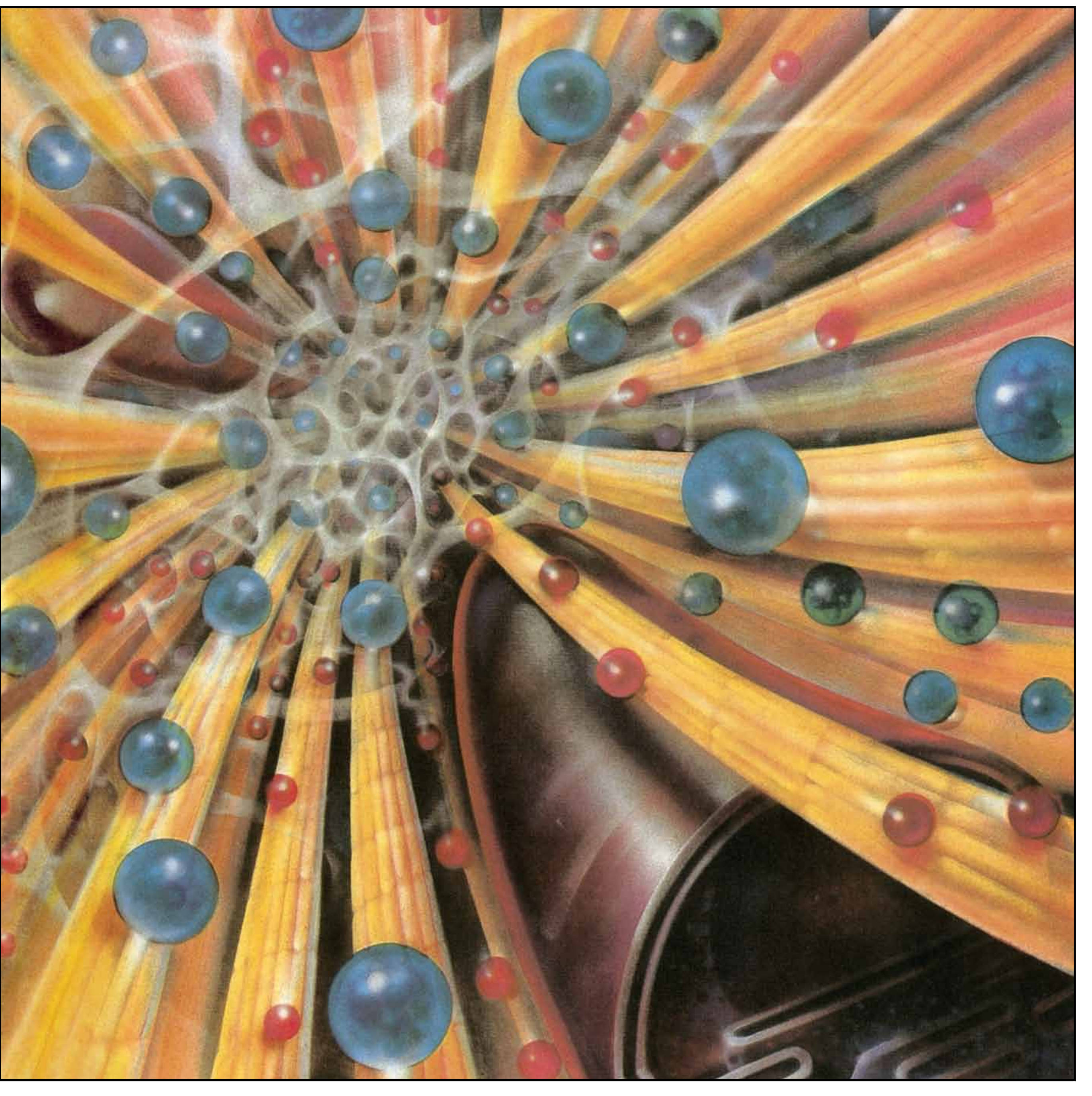
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



MICROTUBULOS

Abril 1987

450 Ptas.
(IVA incluido)

Número 127
Abril 1987

INVESTIGACION Y
CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCION Carlos Oppenheimer, José María Farré Josa
PRODUCCION César Redondo Zayas
PROMOCION EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S.A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)

SCIENTIFIC AMERICAN

DIRECTOR EDITORIAL Jonathan Piel
REDACCION Armand Schwab, Jr. (Subdirector), Timothy Appenzeller, John M. Benditt, David L. Cooke, Jr., Ari W. Epstein, Gregory R. Greenwell, John Horgan, Robert Kunzig, James T. Rogers, Ricki L. Rusting, Karen Wright
DIRECTOR ARTISTICO Samuel L. Howard
DIRECTOR DE PRODUCCION Richard Sasso
PRESIDENTE HONORARIO Gerard Piel

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Ana García García: *El microtúbulo, motor intracelular*; Manuel Puigcerver: *Los púlsares más antiguos del universo*; Santiago Torres Martínez: *Recombinación genética*; Amando García Rodríguez: *Electrones balísticos en semiconductores*; Manuel Crespo: *Ballenas y morsas, labradoras del fondo marino*; Mireia Bofill Abelló: *Rendimiento de la mujer casada en la investigación*; Luis Bou: *El ordenador, instrumento musical* y *Juegos de ordenador;* J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Libros:

Domingo Fletcher, Andrés de Haro, Luis Alonso, Francesc Bujosa y Emilio Santos



PORTADA

El dibujo de la portada muestra la panorámica que se ofrecería a un observador situado en el interior del axón de una neurona. Multitud de microtúbulos (*amarillo*) median en el transporte de vesículas (*azul y rojo*) y orgánulos (*violeta*), que avanzan en ambos sentidos por la prolongación que conecta el cuerpo celular de la neurona con sus terminales sinápticas. El transporte axónico en el que participan los microtúbulos abastece la sinapsis de neurotransmisores elaborados en el aparato de Golgi; retorna, hacia los lisosomas y encapsulados en cuerpos multivesiculares, los excedentes sinápticos de membrana y conduce en ambos sentidos a las mitocondrias, que satisfacen las necesidades energéticas de la célula. En el proceso parece estar implicada una enzima generadora de fuerza (EGF) que, por un cambio cíclico de configuración, controlaría, a la vez, el deslizamiento de los microtúbulos y el movimiento de los orgánulos [véase "El microtúbulo, motor intracelular", por Robert Day Allen, en este mismo número].

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números):
4950 pesetas (IVA incluido)
Extranjero:
Un año (12 números): 35 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)
Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
O'Donnell, 18, 4.° J - 28009 Madrid
Teléfonos 275 88 85 - 275 90 85
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.°, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Carol Donner

Página	Fuente
9-10	F. G. Bernáldez
11-16	F. G. Bernáldez, P. Herrera, C. Levassor, B. Peco, A. Sastre y Ricardo Génova
19	Servicio Geológico de los Estados Unidos
20	Jeffrey L. Travis, Vassar College
21	Dieter Seitz-Tutter y Dieter G. Weiss, Universidad Politécnica de Munich
22	Alan D. Iselin (*arriba*), Dieter Seitz-Tutter y Dieter G. Weiss (*abajo*)
23	Dieter Seitz-Tutter y Dieter G. Weiss
24	Alan D. Iselin
25	George Langford, Universidad de Carolina del Norte
27-33	George Retseck
43	Sheldon Wolff, Universidad de California en San Francisco
44	Andrew Christie
45	Andrew Christie (*arriba*); Charles M. Radding, Facultad de Medicina de la Universidad de Yale (*abajo, izquierda*); Andrew Taylor, Fred Hutchinson, Cancer Research Center (*abajo, derecha*)
46-52	Andrew Christie
57	Michael Rosenfield, Carmello Aliotta y Gordon Wilson, Centro de Investigación Thomas J. Watson de la IBM
58-64	George V. Kelvin, Science Graphics
68-69	Peter Ott
70	Andrew Tomko (*arriba*), Hank Iken (*abjo*)
71	William K. Sacco, Universidad de Yale
72	Larry Martin, LGL Ecological Associates, Inc. (*arriba*); C. Hans Nelson (*abajo*)
73	William K. Sacco
74	Andrew Tomko
77-82	Jerome Kuhl
85	David Rentas
86-89	Gabor Kiss
90	James Kilkelly
92	Gabor Kiss
95-99	Carter Bays y Philip Moore, Universidad de Carolina del Sur
101	Quesada/Burke
102-104	Michael Goodman

ISSN 0210-136X — Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Reprostudy, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

F.GONZALEZ BERNALDEZ, P. HERRERA, C. LEVASSOR, B. PECO y A. SASTRE ("Las aguas subterráneas del paisaje") vienen colaborando desde hace tres años en el estudio integrado del tema del artículo. González Bernáldez es catedrático de ecología de la Universidad Autónoma de Madrid, tras su paso por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Herrera es becario de la CAICYT; Levassor, profesora ayudante de la Universidad Autónoma de Madrid, se dedica al estudio de los factores ecológicos de la competencia y sucesión en comunidades vegetales; Peco enseña en ese centro ecología de sistemas y Sastre, profesor de geodinámica en la Universidad de Alcalá, ha investigado la hidrogeología de la cuenca de Madrid. (Para la realización del trabajo expuesto en este artículo, los autores han contado con la ayuda de la CAICYT.)

ROBERT DAY ALLEN ("El microtúbulo, motor intracelular") fue profesor de biología al frente de la cátedra Ira Allen Eastman del colegio universitario de Darmouth, tras haber trabajado largos años en el laboratorio de biología marina de Woods Hole. La Universidad de Pennsylvania le otorgó el doctorado en 1953; tres años después, le contrataba la de Michigan; en 1960 se trasladó a Princeton. De este último centro se trasladó a la Universidad de Nueva York en Albany, para recalar, en 1974, en Darmouth. Murió de cáncer en 1986. Dieter G. Weiss, de la Universidad Técnica de Munich, le ayudó en la preparación de este artículo.

JACOB SHAHAM ("Los púlsares más antiguos del universo") entró en la Universidad de Columbia con una beca de la fundación Ernest Kempton Adams en 1982. Procedía de su Israel natal. Dos años más tarde se convirtió en profesor de física, adscrito a su laboratorio de astrofísica. La Universidad Hebrea de Jerusalén le había concedido el doctorado en 1971. Realizó el postdoctorado en la de Urbana Champaign, tornando a la capital israelí donde trabajaría, por doce años, en el Instituto Racah de Física. Se ha dedicado, en algún momento de su vida, a la divulgación científica.

FRANKLIN W. STAHL ("Recombinación genética") da clases de biología en el Instituto de Biología Molecular de la Universidad de Oregon. Inició su formación en Harvard, recibiéndose de doctor por la Universidad de Rochester en 1956. Trabajó durante varios años en el Instituto de Tecnología de California antes de entrar en el claustro docente de la Universidad de Missouri. Ha dedicado sus años sabáticos a otros centros fuera de los Estados Unidos: Consejo de Investigaciones Médicas de Gran Bretaña, Universidad Hebrea de Jerusalén y Laboratorio Internacional de Genética de Nápoles.

MORDEHAI HEIBLUM y LESTER F. EASTMAN ("Electrones balísticos en semiconductores") se conocieron en 1985 cuando Eastaman se sumó al cuadro de técnicos visitantes del centro de investigación Thomas J. Watson de la compañía IBM. Heiblum trabajaba allí desde 1978; israelita de nacimiento se doctoró ese mismo año de 1978 en la Universidad de California en Berkeley. Su actual campo de investigación se centra en el transporte balístico de electrones; está casado y tiene cuatro hijos. Eastman ha venido enseñando en el departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de Cornell desde 1957, tras recibir de ésta la birreta de doctor. Esporádicamente ha dado cursos en los laboratorios de la RCA de Princeton y en el Lincoln del Instituto de Tecnología de Massachusetts. En 1980 fundó el Programa Conjunto de Servicios Electrónicos, del que es su director.

C. HANS NELSON y KIRK R. JOHNSON ("Ballenas y morsas, labradoras del fondo marino") estudian la alimentación de los mamíferos en el suelo marino como una extensión de sus dedicación principal. Nelson, geólogo marino del Servicio Geológico de los Estados Unidos desde 1967, participa actualmente en un trabajo interdisciplinar de los márgenes continentales del Mediterráneo y del Atlántico de las costas españolas, financiado por la Secretaría de Estado norteamericana. Se doctoró en oceanografía por la Universidad estatal de Oregon en 1968. Johnson, adscrito al Servicio Geológico desde 1982, está preparando su tesis doctoral en paleobotánica en la Universidad de Yale.

JONATHAN R. COLE y HARRIET ZUCKERMAN ("Rendimiento de la mujer casada en la investigación") trabajan en la fundación Russell Sage, gracias a un permiso de excedencia temporal del departamento de sociología de la Universidad de Columbia. Su investigación actual sobre la influencia del género en la ciencia surgió a raíz de una colaboración anterior sobre el sistema de recompensas en el mundo académico. Cole cursó toda su carrera en Columbia, hasta doctorarse allí también en 1969. En ese centro superior dirige el Instituto de Ciencias Sociales. Desde hace ya varios años Zuckerman ha venido interesándose por la relación entre organización social y desarrollo del conocimiento, como ponen de relieve sus múltiples publicaciones. En 1965 lo contrató la Universidad de Columbia.

MAX V. MATHEWS y JOHN R. PIERCE ("El ordenador, instrumento musical") iniciaron su trabajo en equipo en los laboratorios de la compañía Bell Telephone en la década de los sesenta, cuando Mathews, director entonces del Centro de Investigación Acústica y del Comportamiento, se hallaba desarrollando un programa que permitiría a los ordenadores producir sonidos musicales complejos. Mathews procedía del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Y aunque cesó en la dirección del Centro de Investigación en 1985, prosigue hoy trabajando en violines electrónicos, sistemas de ordenador en tiempo real y percepción de sonidos musicales. Pierce, que se doctoró en 1936 por el Instituto de Tecnología de California, permaneció en los laboratorios Bell desde ese mismo año hasta 1971, cuando volvió al Caltech para dar clases de ingeniería. De 1979 a 1982 dirigió el Laboratorio de Propulsión a Chorro. Anima su situación de jubilado enseñando en la Universidad de Stanford.

Hace...

José M.ª López Piñero

...*trescientos años*

Apareció la *Carta filosófica, médico-chymica*, de Juan de Cabriada, libro que puede considerarse como el manifiesto del movimiento *novator* español en el terreno de la medicina y los saberes químicos y biológicos con ella relacionados.

La causa inmediata de su publicación fue el desacuerdo en una consulta entre varios maduros galenistas de la Corte y un médico joven e innovador. Al defenderse en esta disensión, Cabriada rebasó ampliamente el tema concreto de su dictamen –la abusiva utilización de la sangría– y expuso sistemáticamente sus ideas acerca de la fundamentación totalmente "moderna" de la ciencia.

Juan de Cabriada era un médico nacido en Valencia, hijo de un catedrático de medicina de su Universidad, que había sido amigo y prologuista de Matías García, el principal paladín del galenismo intransigente. Tras concluir sus estudios en el centro valenciano, Cabriada se trasladó a Madrid, donde publicó este libro cuando tenía poco más de veinte años.

El primer objetivo de la *Carta* es refutar reiterada y abiertamente la autoridad de los antiguos. Frente a ella, el único criterio que admite "en las cosas naturales" es la experiencia. Todo un capítulo está dedicado a defender esta nueva base. Su párrafo inicial no puede ser más terminante: "Es regla asentada y máxima cierta en toda medicina, que ninguna cosa se ha de admitir por verdad en ella, ni en el conocimiento de las cosas naturales, sino es aquello que ha mostrado ser cierto la experiencia, mediante los sentidos exteriores. Asimismo es cierto, que el médico ha de estar instruido en tres géneros de observaciones y experimentos, como son: anatómicos, prácticos y químicos." En numerosos lugares de la obra se hace una apasionada defensa de este modo de entender la ciencia, estando salpicado el texto de abundantes experimentos. La doctrina de la circulación de la sangre, uno de sus más brillantes resultados, lejos de ser considerada una rectificación parcial, como hacían los tradicionalistas moderados, es llamada repetidas veces "nuevo sol de la medicina". La información de los nuevos datos e ideas europeas es muy completa y al día, en especial en lo referente a los descubrimientos anatomofisiológicos recientes y a la química, a la que se elogia como "arte de anatomizar la naturaleza".

Cabriada se apoyó en una clara idea del progreso científico. En varios lugares de su libro hizo notar la ignorancia de Galeno y de los autores clásicos en numerosas cuestiones que después se habían ido descubriendo: "¿No vemos que todas las artes y ciencias se han adelantado desde sus primeros inventores? ¿Por qué, pregunto, se ha de negar esto a la medicina, cuando su aumento pende de los experimentos?" No se trataba, por tanto, de despreciar a los antiguos, sino de colocarlos en su verdadero lugar: "Yo considero a los escritores modernos como a un muchacho puesto sobre los hombros de un gigante, que, aunque de poca edad, vería todo lo que el gigante y algo más", afirmó, recurriendo a una vieja imagen. Lo inaceptable era precisamente considerarlos como "autoridades": "Lo que es digno de grande reprehensión y lástima, es que algunos médicos estén tan bien hallados con la esclavitud de los antiguos, que menosprecien los modernos y sus inventos, vituperándolos."

Dentro de la nueva medicina, Cabriada se inclinó por la iatroquímica. Las obras de Silvio y de Willis fueron las fuentes principales de sus ideas, aunque también tuvo en cuenta a otros autores, como Sanctorio, el propio Harvey, Redi, Sydenham y Boyle. Como a la mayor parte de los seguidores de esta tendencia le pesó de manera importante el pensamiento de Descartes, tal como ha puesto de relieve José María Valderas. La adhesión de Cabriada a la iatroquímica fue muy oportuna desde una perspectiva general europea, ya que la fecha de publicación de su libro correspondió al momento de mayor difusión e importancia de la doctrina quimiátrica. Por el contrario, fue anacrónico el tipo de oponentes que Cabriada y la iatroquímica encontraron en España, ya que la inmensa mayoría de los ataques a la iatroquímica se hacía entonces en Europa desde otras posiciones "modernas" o, al menos, desde el eclecticismo. Impugnaciones semejantes a las que tuvo Cabriada –es decir, desde el galenismo más tradicional– habían sido habituales en otros países veinte años antes. Basta recordar a Guy Patin y sus seguidores que, en su lucha contra Silvio, se empeñaron en negar la eficacia del antimonio y del resto de medicamentos químicos y en refutar con argumentaciones escolásticas el fundamento de la nueva ciencia médica.

Es lógico que Cabriada tuviera una clara conciencia del atraso científico español respecto a Europa. Uno de los aspectos más interesantes de su libro es la denuncia que hizo del mismo: "Que es lastimosa y aun vergonzosa cosa que, como si fuéramos indios, hayamos de ser los últimos en recibir las noticias y luces públicas que ya están esparcidas por Europa. Y asimismo, que hombres a quienes tocaba saber esto se ofendan con la advertencia y se enconen con el desengaño. ¡Oh, y qué cierto es que el intentar apartar el dictamen de una opinión anticuada es de lo más difícil que se pretende en los hombres!" También se planteó las razones de dicho atraso, aunque rehuyó entrar en su análisis: "Y es muy de notar que, siendo innato a nuestra naturaleza el deseo de vivir y conservar la vida y que siendo los ingenios españoles los más vivaces y profundos que tiene el mundo, no hayan de haber adelantado en la Medicina de cuarenta años a esta parte, cuando en este tiempo principalísimamente se ha exornado de las nuevas cuanto verdaderas noticias físicas, anatómicas y químicas, por los ingenios del Norte e Italia. Qué sea la causa, yo no la sé, ni la quiero averiguar."

Su actitud, sin embargo, no tuvo nada de derrotista, ya que se preocupó de recomendar los medios para superar la situación. Propuso, por ejemplo, la creación en España de academias y laboratorios y también que fueran llamados a colaborar destacados científicos extranjeros: "¿Por qué, pues, no se adelantará y se promoverá este género de estudio? ¿Por qué, para poderlo conseguir, no se fundará en la Corte del Rey de España una Academia Real, como la hay en la del Rey de Francia, en la del de Inglaterra y en la del señor Emperador? ¿Por qué para un fin tan santo, útil y provechoso, como adelantar en el conocimiento de las cosas naturales (sólo se adelanta con los experimentos físico-químicos) no habían de hincar el hombro los se-


DE
LOSTIEMPOS
YEXPERIENCIAS
EL
MEJORREMEDIO
ALMAL.
PORLANOVA-ANTIGVA
MEDICINA
Carta PHillosophica Medica Chymica
ESCRIPTA
Por el D.tor D. Juan de Cabriada
AFILEATRO.
Sobre la Enfermedad d' Vn Grande desta Corte.
AÑO 1686

Una de las portadas del libro de Juan de Cabriada, Carta filosófica médico-chymica, *que publicó el impresor madrileño L. A. de Bedmar y Baldivia.*

ñores y nobleza, pues esto no les importa a todos menos que las vidas? ¿Y por qué en una Corte como ésta, no había de haber ya una oficina química, con los más peritos artífices de Europa? Pues la Majestad Católica del Rey nuestro señor, que Dios guarde, los tiene en sus dilatados reinos, de donde se podrían traer los mejores. ¡Oh inadvertida noticia! Y si advertida, ¡oh inútil flojedad!"

El libro de Cabriada lleva tres prólogos o "aprobaciones" que proporcionan información muy valiosa acerca de los primeros *novatores*. Uno de ellos es del presbítero Antonio de Ron, representante típico de las tertulias avanzadas de la época y apasionado admirador del empirismo de Bacon. Otro es de José Lucas Casalete, catedrático de medicina de la Universidad de Zaragoza, que fue el único profesor universitario que participó abiertamente en la primera fase del movimiento renovador. El tercero es de Dionisio de Cardona, médico de la reina madre, cuya mentalidad era semejante a la de Cabriada. El prólogo de Cardona está dedicado a defender la libertad "en el filosofar y medicar" sobre la única base de la experiencia como criterio, así como a poner de relieve la necesidad de conocer los hallazgos biológicos y químicos modernos. Incluye también una clara exposición de la idea de progreso científico: "Los científicos médicos... gastan todavía el calor de sus entendimientos sólo en defender doctrinas apolilladas de los primeros maestros de la Antigüedad, los cuales se deben alabar y respetar, pero en perjuicio de la verdad no se han de idolatrar, pues ignoraron mucho de lo que se ha descubierto después... Los venideros se admirarán de nuestra ignorancia... que si en este siglo se saben muchas cosas, muchísimas más se sabrán en el venidero."

La postura vigorosa e inequívoca de Cabriada provocó la inmediata reacción de los galenistas. La década comprendida entre la publicación de su libro y la fundación de la tertulia o "academia" científica que desde mayo de 1700 se llamaría "Regia Sociedad de Medicina y otras Ciencias" estuvo ocupada por el abierto enfrentamiento polémico entre los partidarios de la modernidad y los de la tradición. Cabriada y su obra ocuparon un puesto central en dicho enfrentamiento.

Los ataques contra la *Carta* los inició un folleto que llevaba el expresivo título de *Respuesta que la medicina dogmática y racional da al libro que ha publicado el Dr. D. Juan de Cabriada.* Lo firmaba "El Aduanero", seudónimo sin duda de Andrés Dávila y Heredia, ingeniero militar que un año antes había publicado una *Aduana de impostores de la medicina*, destinada a atacar a Gonzalo Bustos de Olmedilla y a Juan Nieto Valcárcel, médicos que habían criticado algunos aspectos de las doctrinas tradicionales desde posturas asistemáticas de base empírica. El interés de esta identificación reside en el hecho de que nos permite reconstruir los dos frentes que se alinearon en el choque. Uno estaba formado por los seguidores incondicionales de la tradición. El otro, no solamente por los *novatores* en sentido estricto, sino por críticos asistemáticos como Bustos o Nieto y, sobre todo, por personalidades de la subcultura científica extraacadémica que se oponían a las doctrinas clásicas desde formulaciones que incluían algunas noticias de las nuevas ciencias. La tercera publicación de "El Aduanero", por ejemplo, estuvo dirigida contra Cabriada, contra Bustos y Nieto, y también contra Luis Aldrete, el defensor del "agua de la vida" desde bases astrológicas y alquímicas. Estos frentes no estaban reducidos a la medicina y a los saberes biológicos y químicos afines. El propio Andrés Dávila había atacado también en la década anterior

a José de Zaragoza, cabeza de los *novatores* en el campo de las ciencias matemáticas, astronómicas y físicas.

La agrupación en un frente común de todos los que habían formulado críticas a la ciencia clásica no fue un mero recurso polémico utilizado por los tradicionalistas, aunque no cabe duda que resultaba muy favorable para su postura reunir sin distinción a los innovadores serios con los alquimistas y los charlatanes. Parece más bien que su precaria instalación social obligó efectivamente a los auténticos *novatores* a tal alianza. Así se explica que Cabriada prologase una de las obras (1692) del franciscano Buenaventura Angeleres, defensor de unos "arcanos sanativos" con argumentos astrológicos y fisiognómicos combinados con la teoría heliocéntrica de Copérnico. Y también que José Lucas Casalete hubiese escrito años antes una de las "aprobaciones" del libro del sacerdote zaragozano José Vidós, otra pintoresca figura del curanderismo. Incluso no fueron excepcionales escritos como el anónimo *Coloquio entre Diógenes y Pedro Grullo* que defendió simultáneamente a Luis Aldrete y su "agua de la vida", a Juan Nieto y a Bustos de Olmedilla, y al propio Juan de Cabriada.

La primera fase de la polémica en torno a la *Carta* de Cabriada, que duró casi dos años, se mantuvo a base de una inacabable serie de folletos anónimos, que no tardó en convertirse en un mero cruce de insultos personales. El único de cierto interés fue el titulado *Verdad triunfante*, escrito con toda probabilidad por el mismo Cabriada, que reitera con gran energía los puntos de vista expuestos en su obra. La polémica no se redujo a Madrid. En 1688, por ejemplo, apareció en Barcelona el libro *Verdad defendida y respuesta de Filiatro, a la carta medico-chymica*, grueso volumen de casi quinientas páginas, firmado por Cristóbal Tixedas, médico de Perpiñán residente en dicha ciudad.

Aparte de provocar esta reacción inmediata, la obra de Cabriada continuó ocupando una posición central en tres importantes polémicas entre innovadores y tradicionalistas desarrolladas en los años siguientes. La primera de ellas fue la que mantuvieron, en 1690 y 1691, el veronés Giuseppe Gazola y Diego Mateo Zapata, quien poco más tarde se convertiría en el más destacado de los iatroquímicos españoles, pero que entonces era todavía un seguidor del galenismo. Zapata llegó a acusar a Gazola de haber plagiado a Cabriada, acusación exagerada, aunque el veronés elogió calurosamente al médico valenciano: "Esto y cuanto importe a la libertad en el filosofar para el acierto en las cosas médicas, bien os lo dice vuestro agudo naturalista el doctor D. Juan de Cabriada en su *Carta philosophica*, digna obra de consideración de los doctos." También al defender en varios lugares la importancia de la doctrina de la circulación de la sangre remite a su libro. Zapata, por el contrario, de acuerdo con su postura de joven reaccionario tutelado por los catedráticos de Alcalá, dice con desprecio: "Este portentoso invento anatómico de la circulación de la sangre, que tanto blasonan la caterva de químicos y tanto ha ensalzado el Doctor Cabriada, que le llama *nuevo sol* porque le parece que ha destruido las tinieblas de los antiguos."

Siete años más tarde, en 1697, el nombre de Cabriada volvió a aparecer en primer plano con motivo del tardío ataque, muy apoyado en el galenismo francés, que lanzó el catedrático salmantino José Colmenero contra la utilización terapéutica de la quina. Resulta notable que tanto Colmenero como Tomás Fernández, el *novator* que le contradijo, tratasen con gran respeto al médico valenciano, llamándole "doctor maestro".

La tercera de las polémicas citadas fue la que enfrentó, a partir de 1697, a los catedráticos galenistas de la Universidad de Sevilla y a los *novatores* que fundaron la Regia Sociedad de Medicina y otras Ciencias. La personalidad más importante de estos últimos fue Salvador Leonardo de Flores, quien publicó dos libros en defensa de unas ideas enteramente coincidentes con las de Cabriada, uno de ellos prologado por éste.

La creación de la Regia Sociedad de Sevilla abrió una etapa radicalmente nueva en el panorama científico español. En su "Libro Fundacional" se citan diez nombres como "socios fundadores". Entre ellos se encuentran, junto a los contertulios sevillanos de 1697, tres personalidades de inequívoca significación. Dos de ellos son Diego Mateo Zapata y Marcelino Boix y Moliner, personalidades destacadas de la segunda fase de la renovación científica española a comienzos del siglo XVIII. El tercero es el propio Juan de Cabriada. A partir de este momento su figura se oscurece. La última noticia que tenemos de él es que en 1714 ejercía la medicina en Bilbao. Había cumplido ya un destacado y noble papel en la historia de la ciencia en España.

Las aguas subterráneas en el paisaje

El estudio del acuífero de Madrid evidencia el interés ecológico de las descargas de esos cursos subterráneos regionales en razón de los efectos de aquéllas sobre los suelos, vegetación y fauna

F. G. Bernáldez, P. Herrera, C. Levassor, B. Peco y A. Sastre

Las aguas subterráneas intervienen en la regulación de los ecosistemas de un territorio, en la concentración de sales y minerales de un suelo y en su conformación. A pesar de ello, no han recibido el debido tratamiento en la ecología terrestre y se las ha confinado a capítulos marginales de la misma, como pudiera ser el de la vida en los lagos subterráneos o el de su función de capa freática, que condiciona ciertos tipos de vegetación higrófila (propia de zonas húmedas). Obedece ello a que suele creerse que el papel de estas aguas en los ecosistemas terrestres cesa cuando se infiltran por debajo de las raíces de la vegetación.

La verdad es que en esta filtración, a veces muy profunda, de varios kilómetros incluso, pueden describir trayectorias curvas, volviendo a la superficie con nuevas propiedades químicas, adquiridas en su recorrido por el subsuelo e influyendo, consiguientemente, en la vegetación de amplios territorios. Este conocimiento, reciente, fue anticipado ya por Emilio Huguet del Villar, ecólogo y edafólogo español. En su libro *Geo-edafología*, terminado en 1950 y publicado póstumamente en 1983, hace de las aguas ascendentes y de sus efectos uno de los fundamentos de su teoría. Interpreta correctamente numerosos fenoménos ecológicos, edafogénicos y geográficos. Sin embargo, Huguet del Villar desconocía los mecanismos responsables de esa paradójica ascensión del agua, aparentemente en contra de la gravedad.

Recuerda Huguet que, en la historia de la geología, los plutonistas interpretaban, a su juicio acertadamente, los suelos y lagunas salinos de regiones secas por medio del ascenso vertical o casi vertical de aguas mineralizadas. (Posteriormente, esos fenómenos se atribuirían a la concentración de agua meteórica y la obstrucción del drenaje dentro de los procesos endorreicos.) Fue el descrédito del plutonismo y de la teoría del fuego central lo que indujo a abandonar la explicación hipogénica (movimiento del agua en el subsuelo), sustituyéndola por teorías epigénicas con protagonismo de las aguas meteóricas.

Hoy conocemos bastante bien los flujos que se desarrollan en un acuífero libre y sabemos que no hay nada contra natura en la ascensión de las aguas subterráneas. Para su explicación se acude a los efectos del campo gravitatorio y a la diferencia de energía potencial entre el agua de las zonas elevadas y deprimidas; dicha diferencia se mantiene merced al flujo o la evaporación en zonas de descarga. En 1940, Marion Hubbert, de la Universidad norteamericana de Columbia, describía un modelo correcto de flujo para una situación simplificada. A lo largo de las décadas de los sesenta y los setenta, se desarrolla la teoría de sistemas de flujo y se aplica a situaciones reales, más complejas, gracias, sobre todo, a los trabajos de Jozsef Tóth, de la Universidad canadiense de Edmonton. Pero la generalización de su empleo en hidrología es mucho más reciente.

El movimiento del agua en un medio poroso se produce en respuesta a diferencias de potencial hidráulico a lo largo del curso de la misma. (El campo de las diferencias de potencial suele representarse mediante líneas equipotenciales, perpendiculares a las cuales correrían las líneas de flujo.) El agua avanza desde los niveles energéticos más altos a los más bajos: existen, entre unos y otros, diferencias de nivel hidráulico y de presión.

En su avance a través de los poros intergranulares del terreno, el agua experimenta una pérdida de su energía potencial por rozamiento. Henry Darcy, ingeniero francés que a mediados del siglo pasado trabajó en la red de abastecimiento de agua de la ciudad de Dijon, dedujo la ley fundamental del flujo de agua en un medio saturado, según la cual la velocidad de flujo es directamente proporcional al gradiente hidráulico. Se llama gradiente hidráulico a la pérdida de potencial hidráulico experimentada por unidad de longitud recorrida. El factor de proporcionalidad recibe el nombre de conductividad hidráulica, o permeabilidad del medio; su valor varía con el tipo de material poroso considerado. (Es del orden de kilómetros por día en las gravas y de milímetros por día en las arcillas.)

1. DESCARGAS DE AGUAS SUBTERRANEAS en el pedimento granítico de Madrid (zona de Galapagar). La imagen es una fotografía en falso color, donde los tejidos vegetales del pasto más activos (ricos en clorofila) presentan tonos en rojo vivo, mientras que las partes secas, en reposo o con menos concentración de clorofila, muestran tonos verdosos o amarillentos. Los edificios, carretera y afloramientos rocosos aparecen de color blanco o azulado. Se observa la manifestación de las aguas de la descarga en las fracturas del granito y la formación de pequeños cursos de agua o regatos que se deslizan sobre la superficie saturada por la descarga. Como la fotografía está hecha en marzo, la hierba de las zonas encharcadas por el afloramiento del agua están atrasadas y poco activas (por el efecto de la inundación y las bajas temperaturas debidas a que el calentamiento del suelo es más lento). Por el contrario, fuera del área de descarga, los suelos están bien avenados y la hierba, intensamente pastada, muestra un crecimiento muy activo (*parte superior y, bajo la carretera, en la parte inferior*). Los árboles aislados que se observan son las encinas de la dehesa. El uso tradicional por los ganaderos de la zona es alternar el pastoreo de las zonas de recarga (llamadas "cerrillos" o "altos"), utilizadas durante la época húmeda (invierno y primavera) con las zonas de descarga (llamadas "baén" o "bajos"), pastoreadas en la época seca (verano), en la que continúan produciendo hierba por la reserva de agua subterránea de que disponen. Se amortigua con ello la marcada desigualdad estacional.

Otro elemento a considerar en el flujo de las aguas subterráneas es el de la isotropía o anisotropía de los acuíferos. Calificamos de isótropo a un acuífero cuando sus propiedades, en cada punto, no dependen de la dirección en que se consideren; anisótropo es aquel que posee algunas propiedades dependientes de la dirección elegida. En los acuíferos anisótropos, la permeabilidad depende de la dirección espacial. Así, en el de Madrid, estudiado por los autores, que se ajusta a un modelo heterogéneo y anisótropo, las permeabilidad horizontal es unas 20 veces mayor que la vertical.

Los modelos de flujo de los acuíferos se basan en el principio de la continuidad hidráulica regional: una variación de potencial hidráulico puede propagarse de un punto a otro del interior de la región considerada. Para un medio homogéneo y en régimen estacionario —sin entrada ni salida descompensadas de caudal—, las variables del flujo, obtenidas a partir de la ecuación de continuidad y la ley de Darcy, vienen expresadas por una ecuación de Laplace, que requiere para su resolución el establecimiento de condiciones de contorno. Estas últimas las consideró Hubbert, en 1940, bidimensionales para sistemas simples: así, el flujo es vertical en la divisoria de aguas —coincidente normalmente con los interfluvios— y en el fondo de vaguada, es horizontal en el límite impermeable del fondo de la cuenca y en la línea de media vertiente (esto es, la zona aproximadamente equidistante entre el interfluvio y el valle) y, por último, perpendicular al fondo de vaguada. Las soluciones de los modelos matemáticos de flujo pueden representarse por medio de líneas equipotenciales, cuya forma corresponde a distintos planteamientos acordes con la permeabilidad del medio, la morfología del acuífero y la superficie de la zona saturada.

El paisaje situado sobre un acuífero libre (es decir, aquel cuyo límite supe-



rior de la zona saturada está a la presión atmosférica) puede dividirse en zonas de recarga y zonas de descarga de agua subterránea. (El de Madrid, con sus 6000 kilómetros cuadrados de superficie, es un acuífero libre.) Las zonas de recarga suelen hallarse situadas en posiciones topográficas más elevadas, en tanto que las de descarga corresponden a niveles topográficos más deprimidos. En las zonas de recarga, las líneas de flujo tienden a ser divergentes y, convergentes, las propias de las zonas de descarga; en las primeras, además, los valores de las líneas equipotenciales disminuyen con la profundidad. En relación con ello, si instalamos piezómetros (instrumentos que miden el potencial hidráulico, y que consisten en tubos abiertos por su extremo superior, en comunicación con la atmósfera, y en contacto con un punto del acuífero en su extremo inferior) a distintas profundidades, el nivel de agua en los mismos será tanto más bajo cuanto más hondo se encuentre el extremo del piezómetro. Esto se corresponde con el hecho de que el componente vertical del flujo sea descendente en esta zona.

En la zona de descarga, sin embargo, los valores de las líneas equipotenciales crecen de abajo arriba, en dirección a la superficie del terreno. Si se introducen piezómetros a profundidades variables en un punto de la zona de descarga, éstos muestran valores crecientes con la profundidad; nos manifiesta ello que el componente vertical del flujo se orienta hacia arriba. Entre las zonas de recarga y las de descarga existen otras intermedias, donde el componente vertical es muy pequeño y las líneas de flujo se aproximan a la horizontalidad.

Como hemos señalado antes, la forma del acuífero y la del límite superior de la zona saturada condicionan



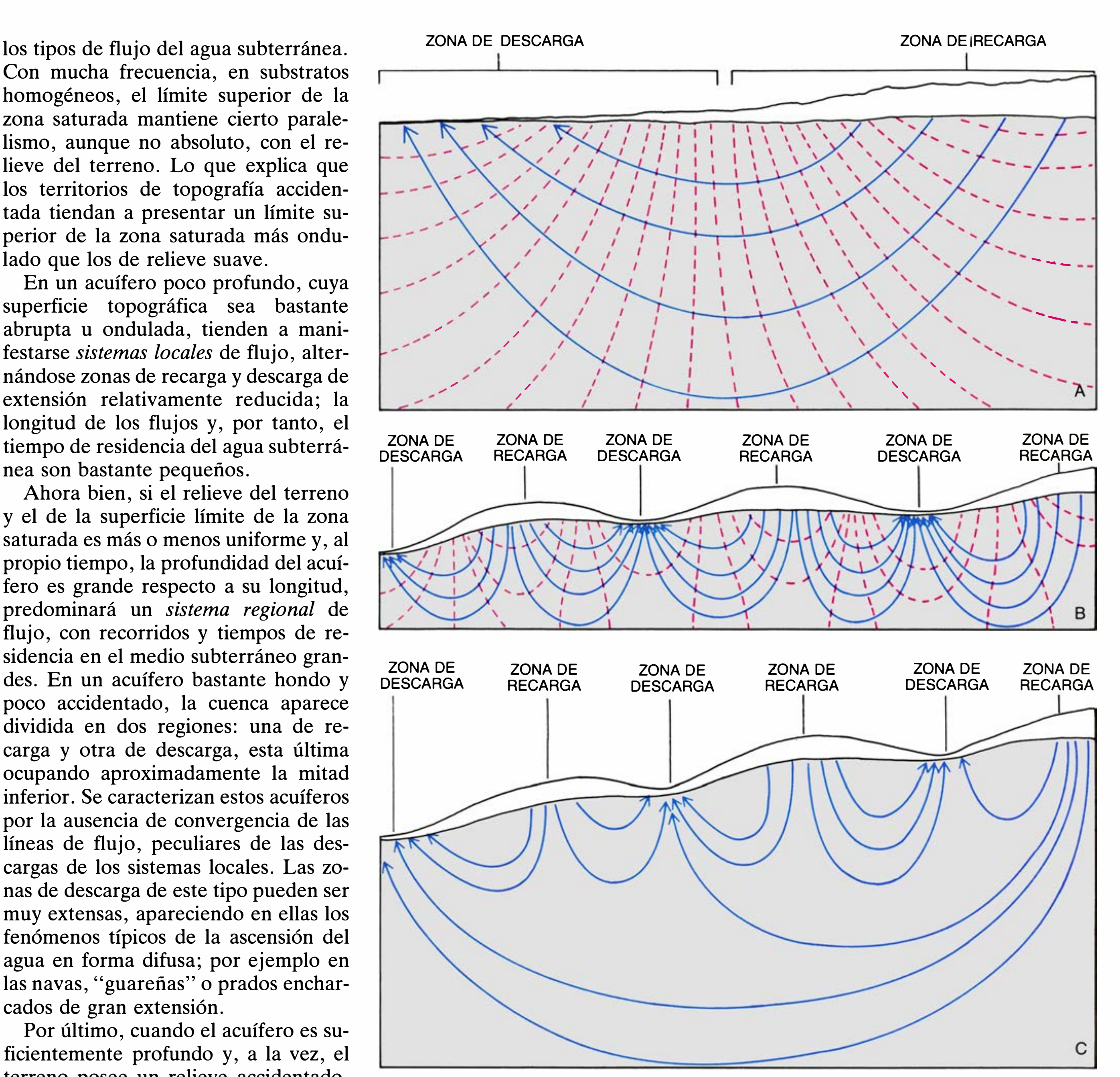
2. DESCARGA DE AGUAS SUBTERRANEAS junto a Torrejón de Velasco (Madrid). La descarga aparece en la fotografía aérea como una banda ondulada de color gris oscuro que cubre la diagonal del cuadrante superior derecho de la fotografía. La manifestación de las aguas subterráneas condiciona la presencia de un juncal cuyas especies contribuyen a transpirar parte del agua próxima a la superficie. La mayoría del agua pasa directamente de la zona saturada a la atmósfera por intermedio de la vegetación, aunque cierto exceso temporal ha dado lugar a la formación de un pequeño curso de agua intermitente. Los sedimentos terciarios en esta zona contienen lentejones de evaporitas que, al ser interceptados por el flujo ascendente del agua subterránea, la salinizan. Entre las especies del juncal se encuentra el junco marino (*Juncus maritimus*), el llantén marino (*Plantago maritima*), la grama punzante (*Elymus pungens*) y otras.

los tipos de flujo del agua subterránea. Con mucha frecuencia, en substratos homogéneos, el límite superior de la zona saturada mantiene cierto paralelismo, aunque no absoluto, con el relieve del terreno. Lo que explica que los territorios de topografía accidentada tiendan a presentar un límite superior de la zona saturada más ondulado que los de relieve suave.

En un acuífero poco profundo, cuya superficie topográfica sea bastante abrupta u ondulada, tienden a manifestarse *sistemas locales* de flujo, alternándose zonas de recarga y descarga de extensión relativamente reducida; la longitud de los flujos y, por tanto, el tiempo de residencia del agua subterránea son bastante pequeños.

Ahora bien, si el relieve del terreno y el de la superficie límite de la zona saturada es más o menos uniforme y, al propio tiempo, la profundidad del acuífero es grande respecto a su longitud, predominará un *sistema regional* de flujo, con recorridos y tiempos de residencia en el medio subterráneo grandes. En un acuífero bastante hondo y poco accidentado, la cuenca aparece dividida en dos regiones: una de recarga y otra de descarga, esta última ocupando aproximadamente la mitad inferior. Se caracterizan estos acuíferos por la ausencia de convergencia de las líneas de flujo, peculiares de las descargas de los sistemas locales. Las zonas de descarga de este tipo pueden ser muy extensas, apareciendo en ellas los fenómenos típicos de la ascensión del agua en forma difusa; por ejemplo en las navas, "guareñas" o prados encharcados de gran extensión.

Por último, cuando el acuífero es suficientemente profundo y, a la vez, el terreno posee un relieve accidentado, coexisten en él sistemas de flujo de distinto orden: locales, intermedios y regionales. (A este último prototipo pertenece el acuífero de Madrid.) Pueden aparecer, entre los sistemas de flujo de distinto orden, áreas nodales, que son aquellas zonas donde los componentes del movimiento se contrarrestan: zonas muertas o de estancamiento, el flujo es en ellas casi nulo.

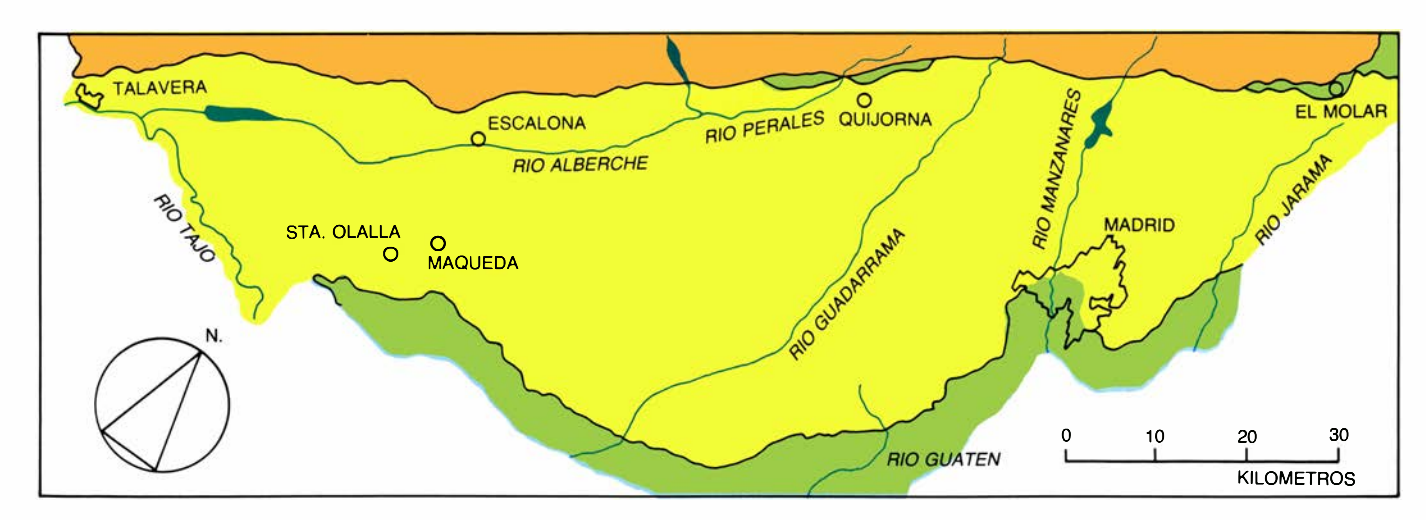


3. LINEAS EQUIPOTENCIALES (*discontinuas*) y de lujo (*flechas*) del agua subterránea en acuíferos libres. La ilustración superior (*A*) corresponde a un acuífero de gran profundidad relativa y escaso relieve, en donde se ha desarrollado un sistema de flujo regional; el esquema central (*B*) ilustra un acuífero poco profundo con fuerte relieve. Se desarrollan sistemas locales de flujo. Por último, en *C*, se esquematiza un acuífero profundo y con relieve considerable; en él coexisten sistemas de flujo locales, intermedios y regionales, y, entre ellos, tienden a formarse zonas nodales donde los componentes se contrarrestan y el flujo es prácticamente nulo.

La distinta longitud de los flujos del agua subterránea en el interior del substrato y, por consiguiente, el prolongado contacto del agua con el medio mineral, sometido a veces a altas temperaturas, tiene importantes consecuencias al regresar el agua a la superficie. La evolución o cambio de la composición química del agua suele ser proporcional a su tiempo de residencia en el medio subterráneo. Investigaciones de los isótopos del agua en el acuífero de Madrid, fundamentalmente oxígeno-18, tritio, deuterio y cloro-36, han permitido confirmar los resultados de los modelos tridimensionales de flujo y datar la edad del agua, en trayectorias regionales profundas, en cientos de miles de años. Otras aguas con trayectorias menos alargadas resultaron tener decenas de miles de años. Naturalmente, junto a esos flujos que alcanzan partes profundas existen trayectorias mucho más cortas con breves tiempos de residencia; en ellos, la composición del agua ha sufrido menos transformaciones, vale decir, se mantiene próxima a la de las aguas meteóricas.

En las trayectorias largas, la evolución geoquímica se manifiesta por el aumento de la mineralización y por cambios progresivos en los iones dominantes, pasando, sucesivamente, del bicarbonato al sulfato y cloruro, en lo relativo al anión dominante, y del calcio y magnesio al sodio, respecto a los cationes.

En su regreso a la superficie, las propiedades químicas de estas aguas quedan denunciadas por sus efectos sobre los suelos y la vegetación. Las descargas de flujos más profundos presentan



4. ACUIFERO DE MADRID, constituido por materiales del Terciario detrítico (arcosas). Se extiende bajo una superficie de 6000 kilómetros cuadrados, con 40 kilómetros de anchura y una profundidad que sobrepasa en algunas zonas los tres kilómetros. Forma una banda paralela al Sistema Central, con predominio de granitos y gneiss, que forma su límite septentrional; al sur, marca sus confines una facies de transición a los materiales evaporíticos. (Estos últimos se formaron en la parte central de la cubeta, ocupada por lagunas salinas durante el Terciario.) La presencia de margas le confiere muy baja permeabilidad.

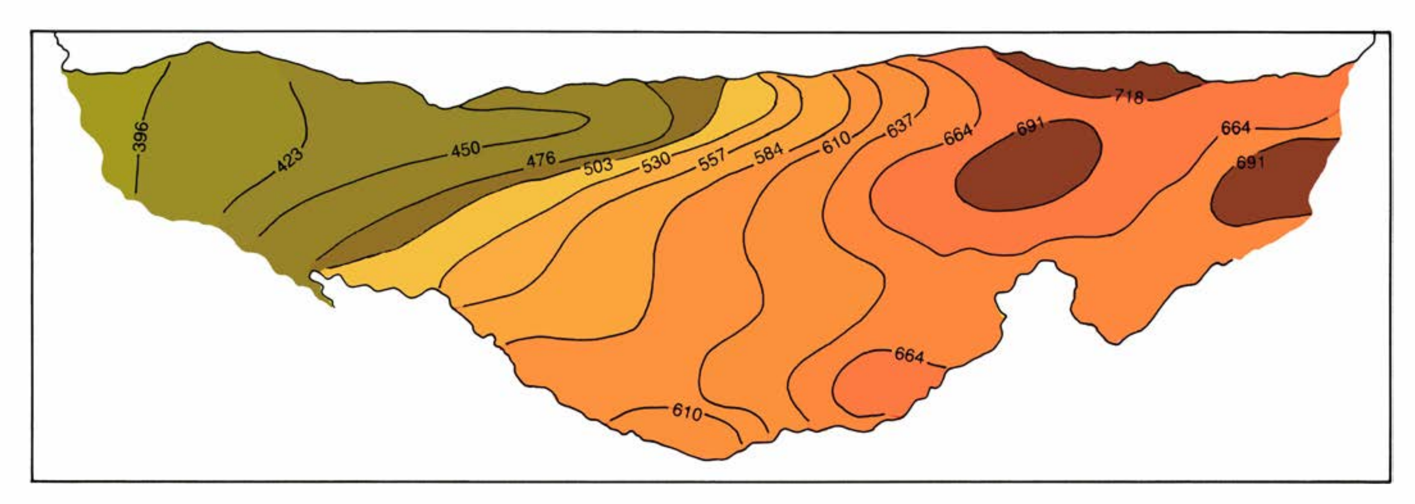
mayor mineralización, a veces incluso salinidad elevada, pudiendo condicionar suelos y lagunas salinos, vegetación halófila (resistente a la salinidad), volcanes de barro o salsas, etcétera. Aguas menos mineralizadas pueden calcificar o costrificar los suelos a largo plazo, ya que su continua evaporación o extracción por raíces va dejando depósitos cristalizados en la superficie del suelo o a cierta profundidad.

El acuífero de Madrid constituye un excelente ejemplo en el que examinar esos efectos. Dadas sus proporciones, tamaño y relieve, presenta, a la vez, flujos regionales profundos, flujos locales relativamente cortos y flujos intermedios. Entre ellos tienden a formar zonas nodales donde los componentes se contrarrestan y el flujo resulta casi nulo.

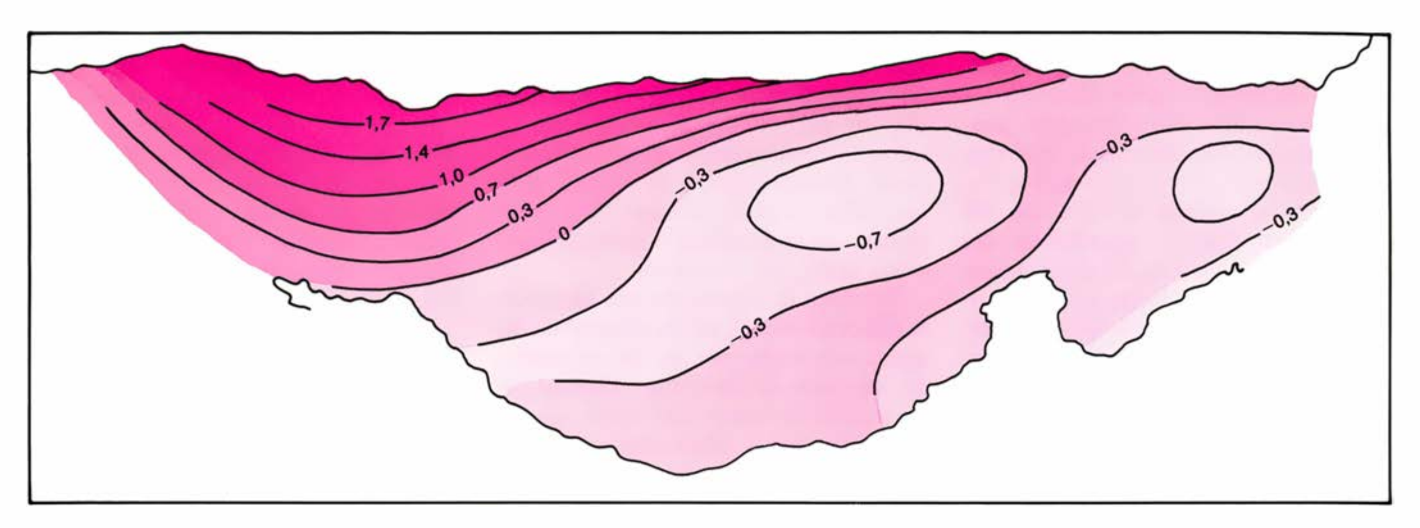
La evolución del agua en contacto con las arcosas del acuífero, a lo largo del tiempo, puede recibir el nombre de envejecimiento. Durante el proceso, el contenido en calcio disminuye, pasando desde valores próximos a 1,5 miliequivalentes por litro en las aguas de no muy antigua infiltración a cerca de 0,3 miliequivalentes por litro en aguas "viejas". El magnesio sufre una caída semejante. Disminuye también la sílice. No así el sodio, que aumenta desde menos de 1 miliequivalente por litro en aguas recientes hasta varias decenas de miliequivalentes por litro en otras añejas.

La acidez del acuífero se mide a través del *p*H de su agua. Este aumenta en un primer estadio, posibilitando la presencia de carbonatos. Crece, a su vez, la mineralización total, pasando la conductividad eléctrica de valores próximos a los 100 microsiemens por centímetro, en el comienzo de la curva de evolución temporal del acuífero, hasta los 200 microsiemens, o más. El ion cloruro es muy persistente una vez que penetra en las aguas subterráneas, y está menos expuesto que otros iones a la deposición o fijación en distintas barreras; aumenta constantemente, desde décimas hasta decenas o centenares de miliequivalentes por litro.

La manifestación de esos sistemas de superficie responde a lo que cabría esperar de acuerdo con los modelos de distintos sistemas de flujo y sus zonas de descarga. Así, por ejemplo, la vegetación de las vaguadas o zonas deprimidas, afectada por el agua subterránea, refleja la composición química del acuífero subyacente, hasta el que llegan sus raíces. Los árboles y arbustos



5. RELIEVE DE LA SUPERFICIE del acuífero de Madrid. Los materiales que rellenaron la cuenca de Madrid, cuya parte detrítica forma hoy el acuífero, proceden de la alteración y transporte de la roca madre del Sistema Central: granito y gneiss principalmente. Esos materiales transitaban durante el Terciario por sus sistemas de pedimentos en dirección a la depresión del Tajo situada al sur, en cuyas lagunas se depositaron las evaporitas. Posteriormente, un basculamiento postplioceno condicionó la convergencia hacia el suroeste (*izquierda*) y la dirección en ese sentido del flujo de aguas subterráneas. La disminución de la aridez del clima indujo también el desagüe hacia el suroeste por un sistema de los ríos Tajo, Guadarrama y Alberche, así como la disección del pedimento.



6. SE LLAMA ENVEJECIMIENTO a la evolución química del agua subterránea por contacto prolongado con el medio. Se representa aquí mediante los valores crecientes de un componente principal, resultante del análisis factorial de 11 variables químicas del agua subterránea. Los valores mínimos corresponden a las zonas de recarga en los interfluvios más elevados. El componente principal, es una combinación lineal de variables en la que aparecen ponderados, de forma negativa, el calcio y el magnesio y, con valores positivos, el sodio y el *p*H, poniendo de manifiesto su aumento en el proceso de envejecimiento.

freatofíticos, que se abastecen de agua subterránea, dan fe de la mayor mineralización: aparece el fresno (*Fraxinus angustifolia*) como árbol típico de las descargas menos mineralizadas, añadiéndose el olmo (*Ulmus minor*) en zonas con aguas ligeramente más evolucionadas en las descargas locales. Ambos son reemplazados por el taray (*Tamarix canariensis*), cuando la mineralización aumenta, en descargas regionales; es decir, cuando encontramos valores de conductividad eléctrica de 1000 microsiemens por centímetro y de sodio por encima de los seis miliequivalentes por litro.

Los indicadores más refinados nos los ofrece, empero, la vegetación herbácea. Los juncales de vaguadas, riberas, navazos, lagunillas y zonas encharcadizas, corresponden, con gran precisión, a las pautas de descarga de los distintos sistemas de flujo.

En este sentido, una serie de plantas caracterizan las zonas de descarga local, en áreas de recarga regional, donde las trayectorias de flujo y el tiempo de residencia del agua son muy pequeños. Entre ellas, una acederilla (*Rumex angiocarpus*), una festuca (*Festuca ampla*), el agróstide de Castilla (*Agrostis castellana*), la achicoria dulce (*Chondrilla juncea*) y otras. La evolución química del agua subterránea de esos humedales es poco significativa. Se trata de aguas jóvenes cuya conductividad no sobrepasa los 500 microsiemens por centímetro y su contenido en sodio es del orden del miliequivalente por litro, en los altos interfluvios que separan el sistema Jarama-Manzanares-Guadarrama-Alberche, de la provincia de Madrid.

En las zonas de descarga intermedia, las aguas han envejecido más en razón de la mayor longitud de las trayectorias de flujo y el superior tiempo de residencia en contacto con el medio subterráneo. La conductividad eléctrica se cifra aquí en unos 1000 o 1500 microsiemens por centímetro; el contenido en sodio, en 5 o 10 miliequivalentes por litro. Estas descargas presentan una vegetación característica, donde han desaparecido las glicófitas, que son plantas adaptadas a las aguas dulces (del griego *glykós*, dulce, y *phyton*, planta). Recordemos el botón de oro bulboso (*Ranunculus bulbosus*), la cebadilla pratense (*Hordeum secalinum*), la festuca elevada (*Festuca arundinacea* subsp. *fenas*), el junquillo (*Carex otrubae*), el junco merino (*Juncus acutus*) y otras. Estas descargas se presentan en amplias vaguadas o depresiones entre los principales interfluvios y, en forma muy pronunciada, en la zona de descarga del tercio distal del acuífero.

Las zonas de descarga regional se caracterizan por una prolongada trayectoria de flujo y un tiempo dilatado. En esas áreas, el sodio llega a valores del orden de 500 miliequivalentes por litro y la conductividad eléctrica puede alcanzar de 10.000 a 60.000 microsiemens por centímetro. La presencia de esas aguas, fuertemente salinas, origina sorprendentes anomalías geoquímicas, sobre todo cuando su surgencia se halla concentrada en enclaves localizados y, por tanto, poco influida o diluida por las aguas meteóricas y otros fenómenos de superficie. Favorecen el desarrollo de una vegetación halófila con el junco marítimo (*Juncus maritimus*), la castañuela (*Scirpus maritimus*), el llantén marino (*Plantago maritima*), las puccinelias (*Puccinellia* ssp.) y almajos (*Salicornia* ssp.). Estas descargas aparecen en el extremo distal del acuífero. Su presencia en depresiones y vaguadas contrasta con la vegetación acidófila y oligotrófica (no muy exigente en cuanto a nutrientes) de los terrenos que la bordean; por ejemplo, jarales de jara pringosa (*Cistus ladanifer*) en pedregales de raña.

El acuífero de Madrid, aunque constituido fundamentalmente por arcosas, no es del todo homogéneo. En su borde meridional, los límites están formados por una facies de transición, desde una facies detrítica hasta una facies evaporítica del centro de la depresión del Tajo; lo componen, sobre todo, margas yesíferas que, por su baja permeabilidad, no presenta las características deseables en un acuífero explotable. El cambio lateral de facies hacia los materiales evaporíticos, que en el Terciario formaron parte de lagunas salinas o *sebkhas*, ofrece una morfología en zigzag. Los materiales evaporíticos contienen sales solubles, cloruros y sulfatos, sobre todo sulfato cálcico.

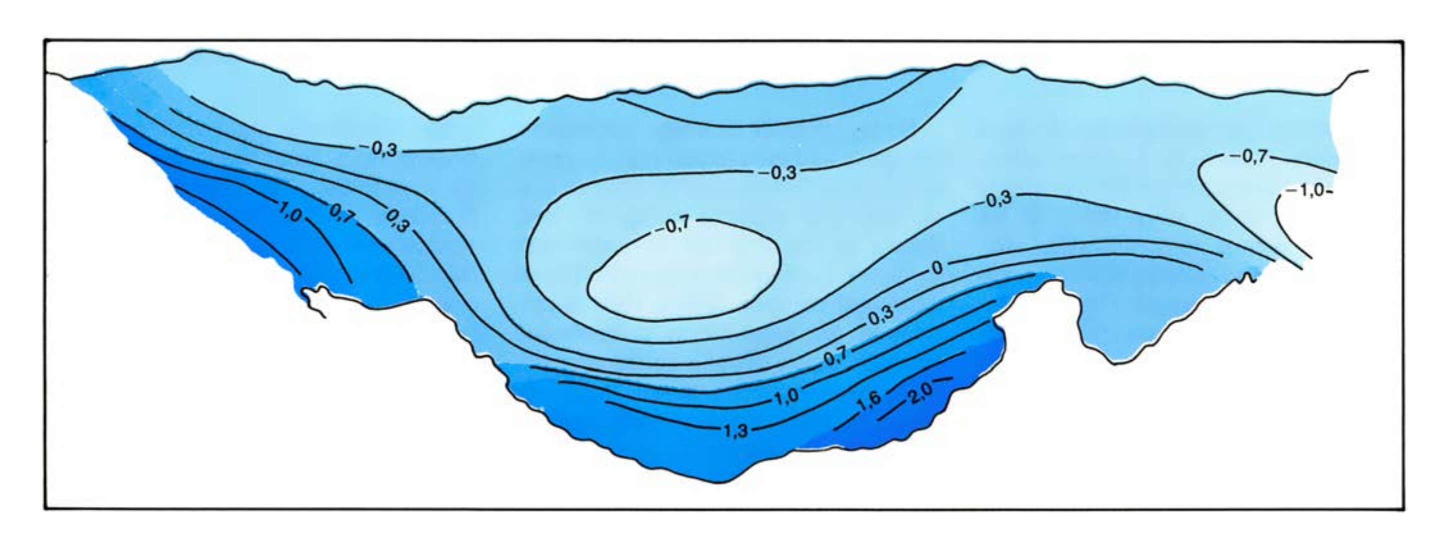
El agua que se infiltra en una zona evaporítica puede mineralizarse rápidamente, sin necesidad del lento proceso de envejecimiento antes descrito. Flujos de aguas subterráneas que se han mineralizado prontamente por contacto con evaporitas pueden penetrar en el acuífero de Madrid, desde las zonas de recarga en evaporitas fuera del acuífero o al atravesar lentejones de estos materiales, que deben hallarse dispersos por todo el acuífero, aunque más frecuentes junto a la facies de transición.

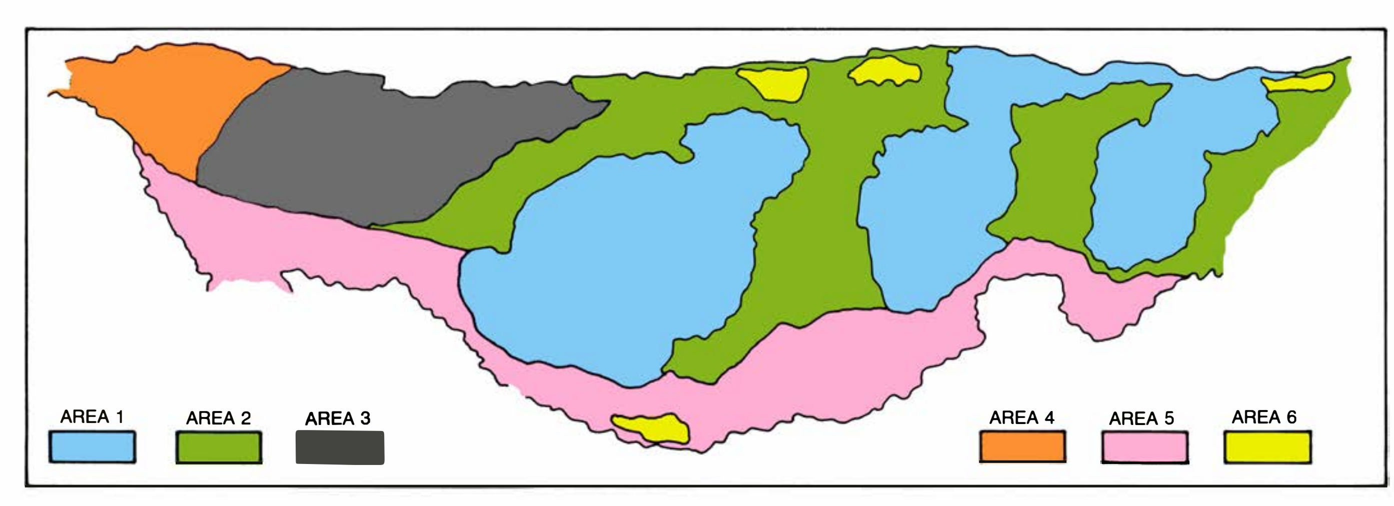
Sin embargo, ambos tipos de trans-

formación química y mineralización del agua -es decir, envejecimiento en materiales arcósicos y mineralización rápida por contacto con evaporitas- pueden diferenciarse por rasgos discriminantes bastante claros. Los autores han procedido al análisis factorial de 300 pozos relativamente superficiales del acuífero, llegando a las conclusiones siguientes. En primer lugar, el agua evolucionada por envejecimiento en las arcosas tiende a ser más alcalina (*p*H por encima de siete); la relación de sodio a calcio es más elevada, en segundo lugar, y, por último, puede presentar carbonatos. Por su parte, el agua que ha estado en contacto con evaporitas ofrecía unos valores altos en sulfatos, reflejaba una concentración bastante elevada de calcio, o dicho de otra manera, una baja relación de sodio a calcio, tenía un *p*H menor y, curiosamente, mostraba contenidos mayores de nitrógeno. Este nitrógeno, de origen sedimentario, revelaba el origen de las evaporitas: lagunas salinas o sebkhas, bajo clima árido, del Terciario.

También la vegetación nos denuncia la diferente composición mineral de las aguas salinizadas por los dos procesos, en sus zonas de descarga. Algunas especies que se comportan como glicófitas en las aguas salinizadas por envejecimiento, así *Dactylis glomerata* ssp. *hispanica* ("jopillos"), se tornan indiferentes cuando se trata de aguas salinizadas por evaporitas, cuya concentración en calcio es superior. Por lo que parece, este ion tiene un efecto compensador del sodio. Las aguas salinizadas por evaporitas presentan, además, indicadores bastante específicos; piénsese, por ejemplo, en el mastuerzo mayor (*Lepidium latifolium*) y otros que tienden a evitar las aguas alcalinas con relativamente poco calcio.

La dificultad de obtener indicadores exclusivamente geoquímicos reside en el hecho de que son muchos los factores que influyen en la vegetación. En el caso español destaca, sobre todo, la intervención del hombre. Por ejemplo, la presencia del trébol fresa (*Tri-*





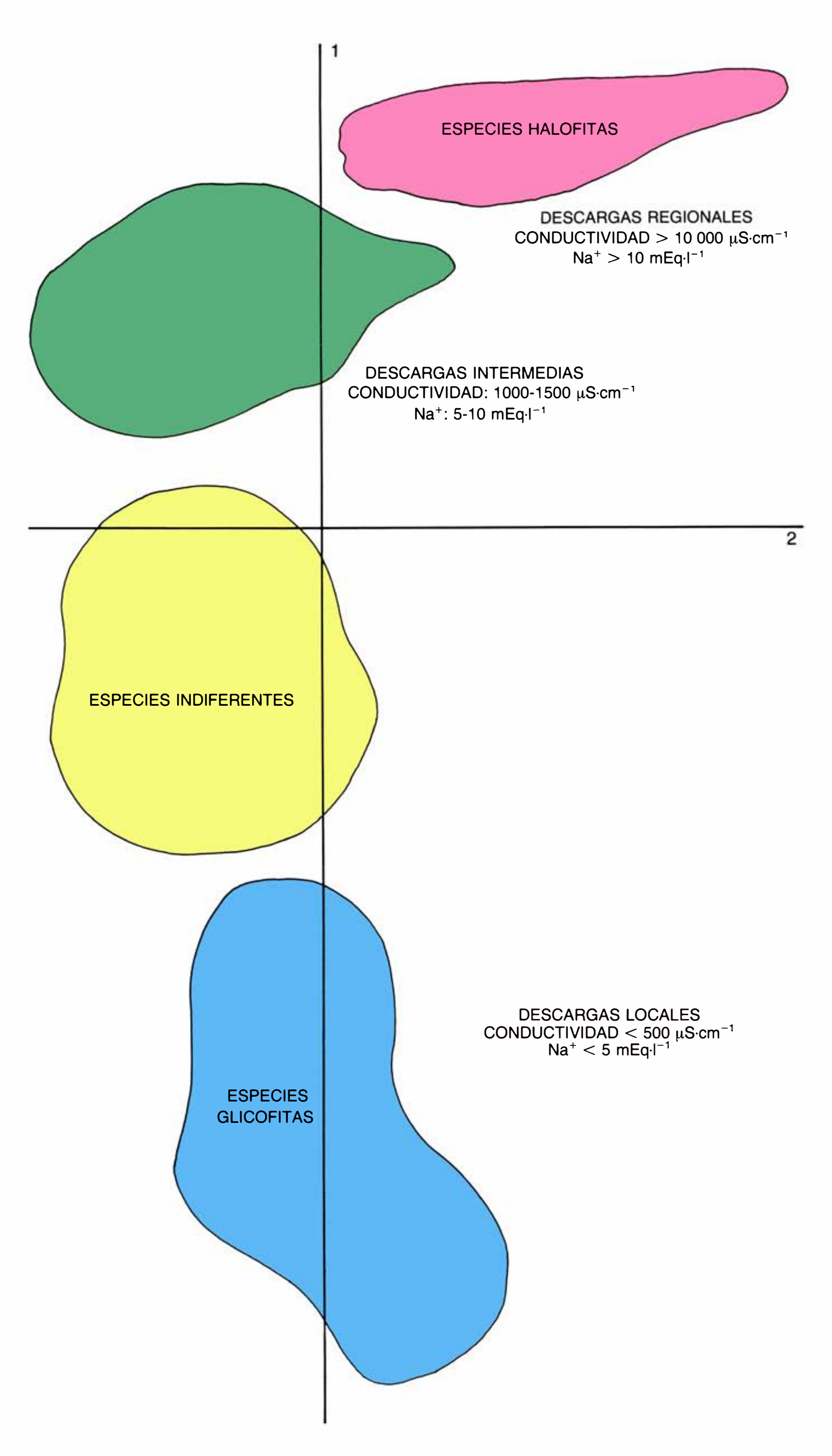
7. RAPIDA MINERALIZACION del agua por contacto con materiales evaporíticos (*ilustración superior*). En el mapa inferior se esquematiza la distribución de los tipos de descarga y la repartición de las especies de la vegetación de juncales en zonas de descarga. La mineralización se infiere del examen del análisis factorial de unos 300 pozos someros del acuífero de Madrid. Los valores más elevados aparecen junto a la facies de transición a las evaporitas, en el límite meridional del acuífero. El componente principal es una combinación lineal que pondera las variables calcio, nitrógeno y sulfato, es decir, las características que mejor identifican las aguas mineralizadas por contacto con evaporitas. La zona *1*, en la distribución de los tipos de descarga, corresponde al área de aparición de descargas locales en puntos de recarga regional, es decir, los interfluvios principales, con trayectorias de flujo muy cortas y escasa mineralización. Se caracterizan por una vegetación glicófita. En la zona *2* pueden aparecer descargas intermedias, con cierto envejecimiento del agua y bioindicadores de ligeros niveles de sodio. La zona *3* corresponde a puntos de descarga intermedia con flujos muy largos y vegetación subhalófita. La zona *4* define puntos de descarga de flujos regionales profundos con alta salinidad y vegetación halófita. La *5* es propia de regiones con aguas subterráneas mineralizadas por contacto con evaporitas; poseen altos niveles relativos de calcio, sulfatos, nitrógeno sedimentario y vegetación de tipo halófito calcícola. Por último, la zona *6* corresponde a las anomalías hidrogeoquímicas producidas por la roca madre, que, en la parte norte, es de materiales oligocenos. En zonas más distales y bajas del acuífero, se presentan enclaves halofíticos con almajo (*Salicornia* spp), puccinellia (*Puccinellia festuciformis*), llantén marítimo (*Plantago maritima*), etcétera, en depresiones donde cristaliza el cloruro sódico en verano. En las zonas más elevadas (área 1), donde las trayectorias de flujo se caracteriza por sus reducidas dimensiones, dominan glicófitas como la acederilla (*Rumex angiocarpus*), el agrostis de Castilla (*Agrostis castellana*) y la achicoria dulce (*Chondrilla juncea*).

folium fragiferum) y la grama de pata de gallina (*Cynodon dactylon*) son buenos indicadores de descargas locales ligeramente mineralizadas, pero sólo aparecen en prados bien pastados y apurados. Si el pastoreo se interrumpe, desaparecen asfixiados por otras plantas. Generalmente, varias especies, formando o no asociaciones, o grupos de indicadores, proporcionarán mayor precisión que una sola especie o un solo indicador.

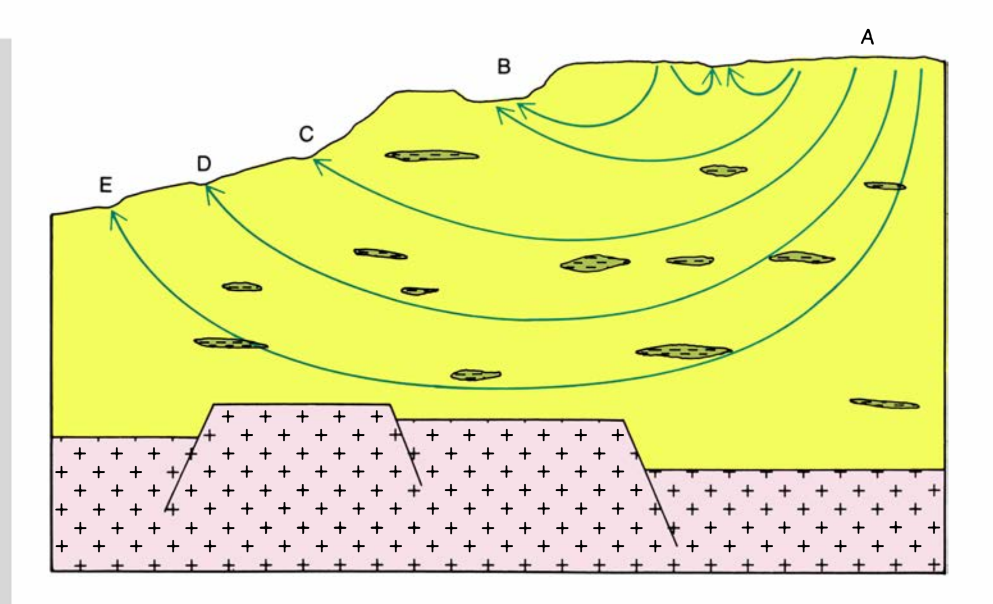
Como Huguet del Villar comprendió perfectamente, el ascenso de aguas con composición química muy diferente de la meteórica y de la que entra por percolación reviste especial importancia en la determinación de la dinámica química de los suelos. Huguet observó que las características hidromórficas de la mayoría de los suelos no se debían a un drenaje impedido por la presencia de una capa impermeable en profundidad, según era la opinión dominante en su tiempo, sino porque, en sus palabras, el drenaje "resulta obstruido cuando es la ascensión de las aguas profundas la que domina", o el drenaje "es libre cuando la filtración o percolación domina sobre la afluencia de agua subterránea".

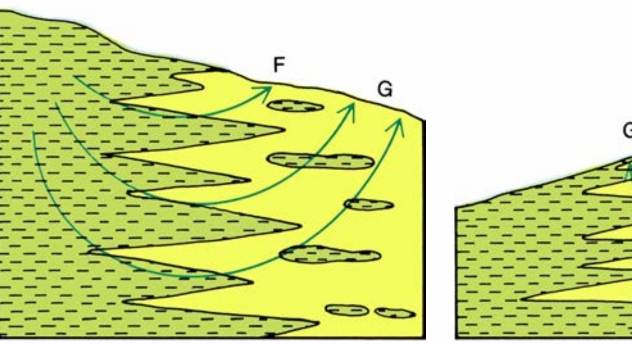
Acierta también Huguet cuando ve en los flujos ascendentes de aguas subterráneas el origen de los suelos salinos, entre ellos los de ambas Castillas, de las lagunas esteparias y de las salsas (volcanes de barro). En efecto, ese tipo de formaciones son indicadores paisajísticos propios de las zonas de descarga regionales, y se presentan en las áreas correspondientes del acuífero de Madrid.

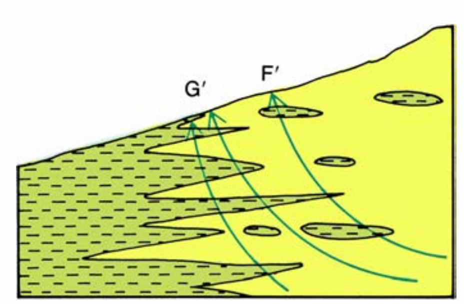
Se han detectado, en ambas mesetas, dos tipos de suelos salinos: *solonchak* y *soloniets*. En la depresión del Duero, de características muy semejantes a la del Tajo, en cuanto al funcionamiento de los sistemas de flujos subterráneos, aparecen suelos de *solonchak*, formados a partir de margas o calizas, y de *soloniets*, desarrollados a partir de sedimentos areno-arcillosos provenientes de la alteración de los granitos. El primer tipo, *solonchak*, tiene un *p*H de 7 a 8; en él domina el calcio sobre el sodio. Los *soloniets* muestran un *p*H más elevado, con un valor por encima de 9, y un predominio del sodio sobre el calcio, incluso en el complejo absorbente. La concordancia con los procesos de evolución experimentados por las aguas subterráneas es exacta: los *soloniets* corresponden a la zona de influencia de aguas envejecidas en los materiales arcósicos, con domi-



8. VEGETACION DE LAS DESCARGAS, constituida por árboles y bosques freatofíticos que aprovechan con sus raíces el agua de la zona saturada. En el acuífero de Madrid, según los niveles de mineralización, crece el fresno (*Fraxinus angustifolia*), el álamo blanco (*Populus alba*), el olmo (*Ulmus minor*) y el taray (*Tamarix canariensis*). Esta última especie aparece para niveles relativamente elevados de sodio y con una conductividad eléctrica del medio superior a los 1000 microsiemens por centímetro, suplantando entonces a las demás. La vegetación de prados o juncales es propia de zonas donde se producen descargas desprovistas de vegetación arbórea y pastoreadas. El junco churrero (*Scirpus holoschoenus*) es bastante indiferente y mal indicador de la mineralización, mientras que el junco merino (*Juncus acutus*) señala las zonas de descarga mineralizadas, a partir de conductividades superiores a los 500 microsiemens por centímetro y concentraciones de sodio algo elevadas. El junco marítimo se presenta en descargas de agua todavía más evolucionadas, con valores de conductividad eléctrica del medio cifrada en varios miles de microsiemens por centímetro.







9. FLUJOS REGIONALES muy profundos con tiempos de residencia muy dilatados dan lugar a descargas de aguas muy salinas. La figura ilustra distintas situaciones del acuífero: áreas de descarga locales en zonas de recarga regional, descargas intermedias, descarga terminal con flujos muy largos y muy salinos. En los esquemas inferiores se ofrecen sendos ejemplos de rápida mineralización del agua en contacto con evaporitas. Estas aparecen en lentejones aislados o, con mayor abundancia, en el borde meridional del acuífero.

nancia del sodio y aumento del *p*H, mientras que en las zonas margosas de flujos en contacto con evaporitas las aguas están caracterizadas por el predominio del calcio y un *p*H menor.

Las zonas de descarga de aguas subterráneas representan fenómenos de gran interés desde otros puntos de vista. Según su forma de manifestarse, que depende del balance entre la evaporación y el flujo de agua, así como del relieve del terreno, darán lugar a cursos de agua (arroyos y ríos, cuando el balance es positivo y el relieve pronunciado) o a lagunas y zonas encharcadizas de distintos tipos, si el relieve presenta obstáculos o es muy llano. Pero una gran parte de las descargas del acuífero se hace por evapotranspiración a través del suelo y vegetación.

En regiones secas, merced al hecho de que la vegetación de zonas de descarga posee una reserva de agua durante el período seco, no se limita la evapotranspiración a través del suelo y vegetación. Las zonas de descarga pueden constituir áreas de productividad mayor en las regiones donde el agua constituye un factor limitante para la fotosíntesis de la vegetación terrestre. Algunas zonas de descarga de la región mediterránea sirven para el pastoreo durante el estío, contribuyendo a compensar la desigual repartición de las precipitaciones.

Estas últimas zonas suelen representar anomalías biogeográficas botánicas y zoológicas. En un estudio de A. Sterling, de la Universidad Autónoma de Madrid, se ha comparado la fauna de los grupos biogeográficamente mejor estudiados (mariposas y aves, principalmente) en las zonas de descarga del acuífero de Madrid. En las mesetas castellanas, los sotos contrastan, por ejemplo, con el entorno circundante debido a su fauna, muy semejante a la de territorios montanos. Así, existen ropalóceros (mariposas diurnas) "higrófilos", ligados a las zonas de descarga: pavito (*Inachis io*), lobito agreste (*Pyronia tithonius*), maculada (*Pararge aegeria*), blanca verdinerviada (*Pieris napi*), poligonia blanca (*Polygonia c-album*), ninfa de

los arroyos (*Limenitis reducta*), náyade (*Celastrina argiolus*), celda limpia (*Plebicula thersites*), etcétera.

Este contraste se produce también en el caso de las aves. No sólo es notable el fenómeno más conocido de las aves acuáticas ligadas a las zonas de descarga con agua en superficie, sino que también las descargas evaporativas, sin manifestación de agua superficial, poseen una avifauna de verano característica. Así, en los sotos, llaman la atención: el mirlo (*Turdus merula*), la curruca capirotada (*Sylvia atricapilla*), el mito (*Aegithalos caudatus*), el ruiseñor (*Luscinia megarrhyncos*), el petirrojo (*Erythacus rubecula*), el mosquitero (*Phylloscopus collybita*), etc.

Por todas estas razones, las zonas de descarga de agua subterránea tienen un gran valor paisajístico, con la presencia de árboles freatofíticos, y un extraordinario interés ecológico al mantener la diversidad biológica que se produce por la alternancia de las zonas de recarga con las de descarga de agua.



10. DESCARGA DEL ACUIFERO DE MADRID en el Terciario detrítico; está señalada por la presencia de vegetación freatofítica (banda de color verde claro debida al fresno de Castilla) que contrasta con los tonos más grisáceos de la vegetación xerofítica circundante (fundamentalmente encina carrasca). El agua subterránea muy próxima a la superficie es en gran parte captada por las raíces de las freatofitas y evaporada en las hojas tras su paso por los tejidos conductores, dando lugar a una "descarga por evaporación", o paso directo desde el acuífero a la atmósfera. La disipación de energía debida al proceso de evaporación origina un microclima fresco y confortable en verano que contrasta con el entorno fuera de la descarga. Esto es debido a que las encinas, al irse agotando el agua del suelo, cierran los estomas y suprimen su transpiración.

El microtúbulo, motor intracelular

Los microtúbulos constituyen elementos bien conocidos del armazón que organiza la forma y el proceso de división celulares. Una nueva y poderosa técnica microscópica revela su participación en el transporte bidireccional

Robert Day Allen

La incorporación de los microtúbulos en la lista de componentes celulares ubicuos es reciente. Treinta años atrás sólo se sospechaba la existencia de tenues filamentos. Hace 25, los biólogos comenzaban a familiarizarse con sus rasgos característicos. Cuando se dispuso de métodos que permitieron observarlos, los microtúbulos demostraron poseer una variedad sorprendente de funciones, desde la formación del huso que dirige la división celular hasta la de los filamentos que ciñen las células sanguíneas que nunca se dividen. Pronto se les consideró unidades estructurales permanentes del citoesqueleto.

Parece ahora que la versatilidad de los microtúbulos trasciende la mera actuación estructural. Valiéndonos de nuevas técnicas de microscopía óptica realzada por ordenador hemos logrado observar cómo transportan vesículas y orgánulos por el citoplasma a una velocidad sorprendente. Un mismo filamento, delgado, de varios micrometros de longitud y compuesto principalmente por la proteína tubulina, puede mover, a un mismo tiempo, partículas en sentidos opuestos. Más aún: fragmentados incluso y separados del ambiente celular que le es propio, los microtúbulos son capaces de avanzar por un portaobjetos de vidrio.

Mis colegas y yo nos hemos interesado por el mecanismo de que se sirven los microtúbulos para desplazarse a sí mismos y a su cargamento intracelular. Nuestro trabajo, y el de otros muchos investigadores, ha revelado la participación de los mismos en el sistema de transporte que coordina el tráfico entre el cuerpo celular y las prolongaciones de las neuronas. Las alteraciones de los microtúbulos pueden relacionarse con doce o más trastornos nerviosos del ser humano. Dejando aparte el sistema nervioso, el transporte microtubular interviene en fenómenos tan dispares como los cambios de color de los peces o el movimiento de los virus en el interior de las células. En consecuencia, nuestra investigación puede aportar valiosa información a áreas muy alejadas de los sencillos protozoos acuáticos que atrajeron mi primera atención.

El movimiento de partículas que actualmente denominamos transporte dependiente de los microtúbulos se estudió mucho antes de que se descubrieran esas estructuras. La referencia histórica más clara de dicho transporte procede de Joseph Leidy, naturalista y microscopista del siglo XIX. Leidy descubrió, en una charca cercana a su casa, un curioso animal con una extraordinaria red de filópodos, "falsos pies". El organismo, al que denominó *Gromia*, era un foraminífero, un pariente dulceacuícola del plancton, que apenas se distingue a simple vista. En el interior de sus filópodos tentaculares, Leidy observó una corriente de movimiento, que describió en un informe para el Servicio Geológico de los Estados Unidos fechado en 1879: "Los pseudópodos del *Gromia* están formados por un protoplasma granular pálido, con gránulos más gruesos y mejor definidos . . . en constante movimiento a lo largo de las fibras, que fluyen en sentidos opuestos en todas ellas, salvo en las de mayor finura."

Observadores posteriores corroboron esa meticulosa descripción de los filópodos del *Gromia*, pero añadieron muy poco para facilitar la comprensión del sorprendente flujo. En el entorno humano, los flujos que se registran en el interior de un recipiente cerrado sólo avanzan en un sentido: a favor de un gradiente de presión. Lo que fascinó al autor y a otros investigadores modernos de la retícula del foraminífero fue que, en el interior de un mismo filópodo, las partículas parecían fluir a diferente velocidad y en sentidos contrarios. Los foraminíferos violaban las leyes vigentes.

Costó algún tiempo descifrar el secreto de *Gromia*. En 1957 visité a Zach M. Arnold, de la Universidad de California en Berkeley, para estudiar el movimiento filopodial de *Allogromia laticoblaris*, foraminífero marino que Arnold había cultivado y al que había dado nombre. Con el tiempo, ese organismo y un *Allogromia* sp. N.F. afín constituirían la materia prima de los importantes experimentos que relacionarían el movimiento de las partículas con los microtúbulos. Ambos son similares a *Gromia*, pero, a diferencia del foraminífero de Leidy, se multiplican en cantidad suficiente para abastecer las investigaciones y ofrecer, por tanto, un buen modelo experimental.

Visité el laboratorio de Berkeley seis años antes de que se descubrieran los microtúbulos, cuando las técnicas microscópicas se encontraban en un estadio primitivo, incapaces de discernir todavía las estructuras con precisión superior a la del propio Leidy. La investigación resultaba lenta y tediosa. Pese a todo, pudimos plantear algunas hipótesis sencillas relativas a los patrones de movimiento y contrastables mediante la observación. Valiéndose de tal metodología, Theodore L. Jahn y Robert A. Rinaldi, de la Universidad de California en Los Angeles, sugirieron, en 1959, que las partículas en movimiento quedaban atrapadas por fibras "miriápodas" de gel capaces de arrastrarse unas sobre otras, que se

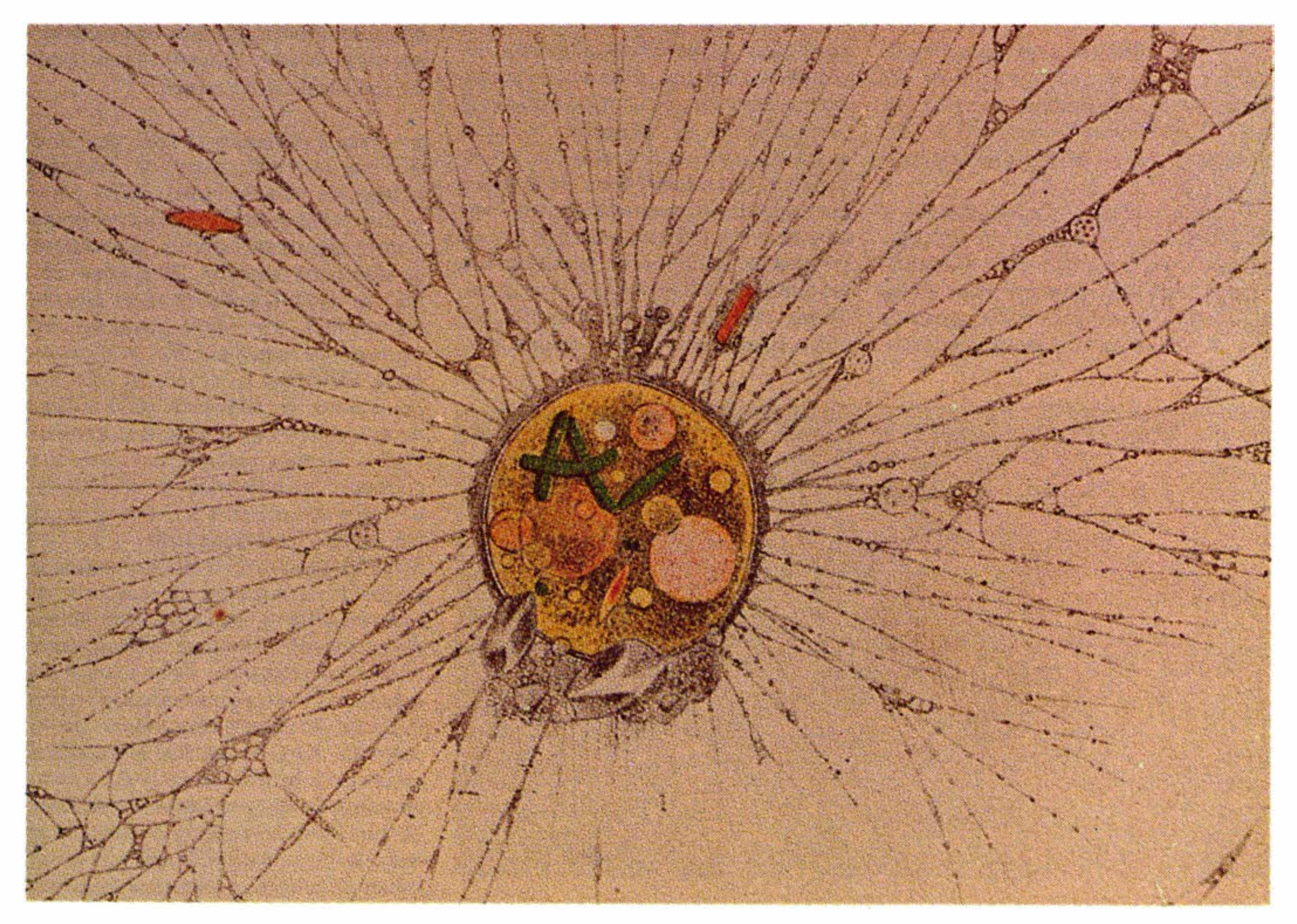
desplazaban mutuamente por medio de "pequeñas extremidades".

Mi experiencia con *Allogromia* y otros foraminíferos emparentados que estudié en el Laboratorio de Biología Marina de Roscoff, Francia, me inducía a pensar que la interpretación de Jahn y Rinaldi probablemente fuera demasiado sencilla. En los "pies" más finos de los protozoos, las partículas avanzaban más deprisa hacia el ápice que en sentido opuesto. Propuse un modelo según el cual los filópodos menores contenían fibras de gel en V, plegadas sobre sí mismas, que se contraían en las regiones encorvadas próximas al ápice. Aunque el modelo daba cuenta del movimiento de las partículas más rápidas en un sentido, estudios posteriores demostraron que no se acercaba más a la verdad que el de los autores de la Universidad de California en Los Angeles.

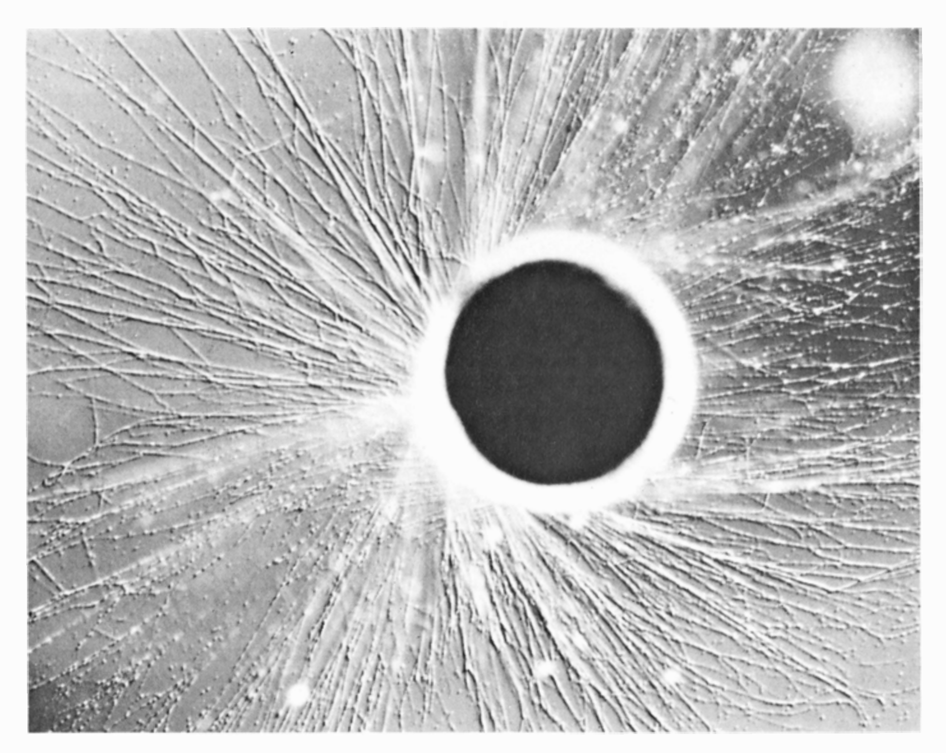
En el transcurso de mis primeros trabajos había observado también que la red de filópodos brillaba intensamente bajo el microscopio de polarización. Fenómeno que sugería la presencia de fibras submicroscópicas dispuestas siguiendo una orientación. Las fibras debían ser muy delicadas o inestables, pues el menor cambio de las condiciones externas provocaba su descomposición en hileras de gotitas citoplasmáticas unidas entre sí por "mallas" membranosas.

Precisamente esa fragilidad obstaculizó, durante casi diez años, mis intentos de demostrar que en las redes de filópodos de los foraminíferos abundaban los microtúbulos. En 1963, David B. Slautterback, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Wisconsin, comprobó su presencia en el pólipo de agua dulce *Hydra*. Ese mismo año, Myron C. Ledbetter y Keith R. Porter, de la Universidad de Harvard, encontraron microtúbulos en células vegetales. Inmediatamente sospechamos que los "elementos rígidos" de los filópodos de *Allogromia* eran también microtúbulos. No obstante, hasta 1971, Samuel M. McGee-Russell y yo, que a la sazón trabajábamos en la Universidad estatal de Nueva York en Albany, no logramos diseñar un procedimiento que superara los hasta entonces limitados métodos de preparación de especímenes, que fragmentaban los microtúbulos antes de su observación al microscopio electrónico.

Hubo de transcurrir otra década para que obtuviéramos prueba documental de la conexión directa que guardaban los movimientos de partículas y los microtúbulos. En 1981, dos adelantos simultáneos conseguidos en mi laboratorio del Darmouth College mejoraron radicalmente la detección visual de las frágiles fibras. Jeffrey Travis, alumno de licenciatura que trabajaba conmigo en el estudio de la movilidad de *Allogromia*, ideó un método para cultivar el organismo sobre los portaobjetos de vidrio utilizados en microscopía óptica. Trataba los portaobjetos con sustancias de carga positiva, como la poli-L-lisina; los filópodos se adherían al cristal y se extendían en láminas anchas y aplanadas, ideales para



1. *GROMIA*, un pariente dulceacuícola de las amebas, en el que, hace más de un siglo, se descubrió el transporte bidireccional. El microscopista Joseph Leidy, que dibujó esta ilustración en 1879, observó la presencia de "gránulos" que fluían en ambos sentidos a lo largo de los filópodos largos y delgados que se extienden, cual tentáculos, del cuerpo del animal. Resultaba inexplicable que, en el interior de un mismo recinto, el flujo avanzara en dos sentidos opuestos; las múltiples hipótesis formuladas para explicarlo estimularon las investigaciones del autor. A simple vista, *Gromia* no supera el tamaño de un grano de arena.



2. REDES ENTRELAZADAS de filópodos que se proyectan del oscuro cuerpo celular del foraminífero marino *Allogromia*, vistas aquí en una fotografía obtenida al microscopio de contraste interferencial. La primera prueba directa de la intervención de los microtúbulos en el transporte de partículas fue fruto de la observación de las ramificaciones transparentes de este organismo, que mide medio milímetro de ancho.

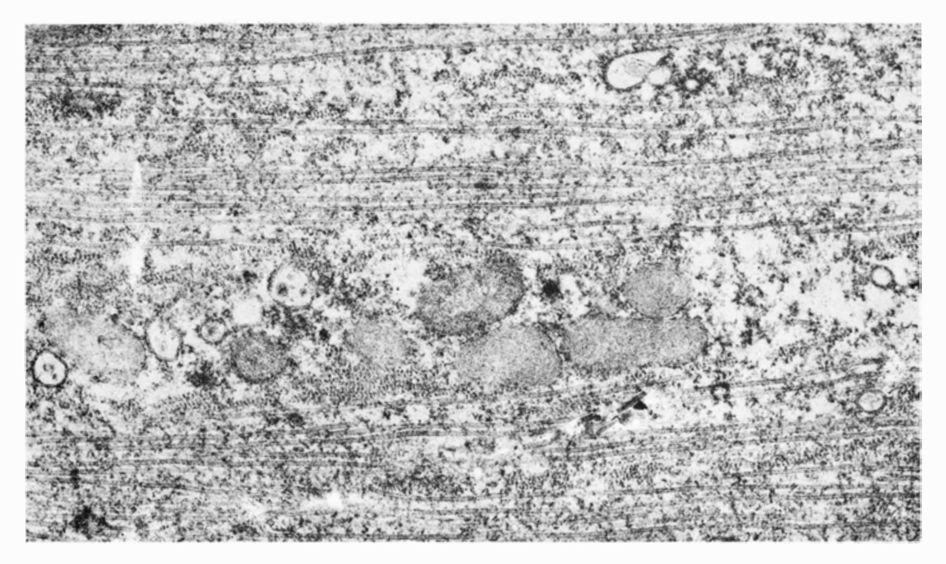
observar el tráfico de orgánulos. Travis preparó también muestras íntegras, no fraccionadas, revelándose por primera vez la complejidad del circuito de microtúbulos en el microscopio electrónico.

Contemporáneamente, mi descubrimiento de lo que habría de llamarse microscopía de contraste vídeo-intensificada Allen (AVEC) nos permitió visualizar estructuras diez veces menores que las que se distinguían al microscopio óptico. Observábamos incluso microtúbulos aislados, pese a que sus diámetros eran sólo de 25 nanómetros (25 cienmilésimas de milímetro). Gracias al microscopio AVEC, Travis y yo observamos la interacción entre partículas y microtúbulos. Comprobamos que bastaba el contacto físico para que los microtúbulos imprimieran aceleración a las partículas estacionarias. Asimismo, Travis observó que los microtúbulos efectuaban movimientos axiales y laterales por el interior de la red filopodial. Sin embargo, no pudimos determinar si se empujaban mutuamente o si el movimiento era de arrastre pasivo. Tampoco conseguimos averiguar si las partículas podían moverse sobre un único microtúbulo.

Ante la posibilidad de que esas limitaciones se debieran al modelo experimental que utilizábamos, abandonamos el estudio de *Allogromia* para centrarnos en otros sistemas celulares abordables con el método AVEC. Nos interesamos por el transporte de orgánulos a lo largo de los axones, las principales prolongaciones de las neuronas, a través de los cuales se conducen los impulsos nerviosos. Se sabía que en el transporte axónico de las neuronas de pollo se movilizan partículas en ambos sentidos a razón de 200 milímetros diarios, lo que constituye una velocidad considerable en la escala microscópica. En 1965, otro de mis alumnos de licenciatura, William Burdwood, describió ese transporte rápido. El efecto causado por su hallazgo fue espectacular; durante los 15 años siguientes se formularon muchas hipótesis para explicar el hecho. Puesto que las pruebas directas eran escasas, ninguna teoría gozó de aceptación privilegiada.

Durante el verano de 1981, que pasé en el Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole, decidí comprobar si del procedimiento AVEC podía arrojar alguna luz sobre el mecanismo de transporte axónico. Elegí como objeto de investigación el axón gigante del calamar, que forma parte de una neurona de gran tamaño y transparente, ideal para mi propósito, salvo en un aspecto: se carecía de todo indicio de movimiento en el axón del calamar. Pedí a algunos colegas, con gran experiencia en neuronas de invertebrados, que se unieran a mi empeño en el laboratorio de Woods Hole.

Sin el equipo de AVEC, las observaciones al microscopio de contraste de interferencias diferenciales resultaban decepcionantes. Sólo se intuían vagamente los contornos del axolema (la membrana que envuelve al axón) y una fina capa de células conjuntivas que lo recubría. Nada se movía. Recurrimos entonces a la técnica de AVEC y conmutamos la imagen hacia un monitor de televisión. De repente, la pantalla se llenó de pequeñas partículas que avanzaban en ambos sentidos, resiguiendo algún tipo de "filamentos". Nuestro entusiasmo se extendió por todo Woods Hole.



3. HACES DE MICROTUBULOS del interior de un filópodo de *Allogromia*, dispuestos en una orientación característica. Los grupos se alinean en filas paralelas al eje longitudinal del filópodo. La electromicrografía recoge también espirales laxas de tubulina, que aparecen, aumentadas 24.000 diámetros, formando pequeñas manchas dispersas por el interior de los grupos de microtúbulos. Entre los haces se distinguen vesículas.

En julio efectuamos las primeras grabaciones del transporte de partículas en el axón gigante del calamar. Se identificaba la mayoría de partículas por su tamaño. Las mitocondrias, grandes y alargadas, que en su interior portan la molécula rica en energía adenosín trifosfato (ATP), avanzaban en ambos sentidos a sacudidas, de modo discontinuo. Se distinguían también partículas esféricas, menores, que se dirigían hacia el cuerpo de la célula: los cuerpos multivesiculares, que transportan la membrana "sobrante". Otras partículas menores aún, apenas visibles, se movían sin cesar en grupos, cual minúsculos bancos de peces, hacia la terminal sináptica, es decir, hacia el extremo final del axón. Se trata de los precursores de las vesículas sinápticas, que acarrean las sustancias transmisoras que se liberarán al estimularse la neurona. Nunca se las había visto con el microscopio óptico.

Tras el primer momento de euforia, empezamos a valorar los hallazgos. Cuando menos, en nuestros ensayos se había establecido la dirección que seguían las partículas y se había comprobado que las de tamaño mayor avanzaban más lentamente que las pequeñas. Según parecía, habíamos aportado también la primera prueba de la existencia de movimiento continuo en las células animales. No se esperaba en ellas un transporte de esas características, pues, hasta entonces, sólo se había observado movimiento continuo en las denominadas corrientes protoplasmáticas de las células vegetales. El movimiento de partículas en las células animales siempre se había considerado discontinuo.

¿Qué impulsaba el movimiento? No parecía que una corriente citoplasmática arrastrase las partículas, a semejanza de lo que se observaba en las células vegetales. Algunos investigadores habían sugerido que la carga eléctrica que acompañaba el impulso nervioso podría, abastecer de energía el transporte axónico. Sin embargo, éste no parecía resentirse del estímulo eléctrico de los axones. Las partículas seguían, invariablemente, la trayectoria de los "elementos lineales", que recordaban muy de cerca a los microtúbulos observados en *Allogromia*.

Reflexionando sobre nuestros hallazgos, comenzamos a sospechar si los microtúbulos no estarían relacionados con el transporte de partículas tanto en los foraminíferos como en las neuronas. Pero no había que olvidar que los axones alojaban, asimismo, otros elementos lineales: neurofilamentos y F-actina; en 1981, la opinión más generalizada admitía que, de los tres, la F-actina era la que con mayor probabilidad se relacionaría íntimamente con el transporte axónico [véase "Transporte de sustancias en las células nerviosas", por James H. Schwartz, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1980].

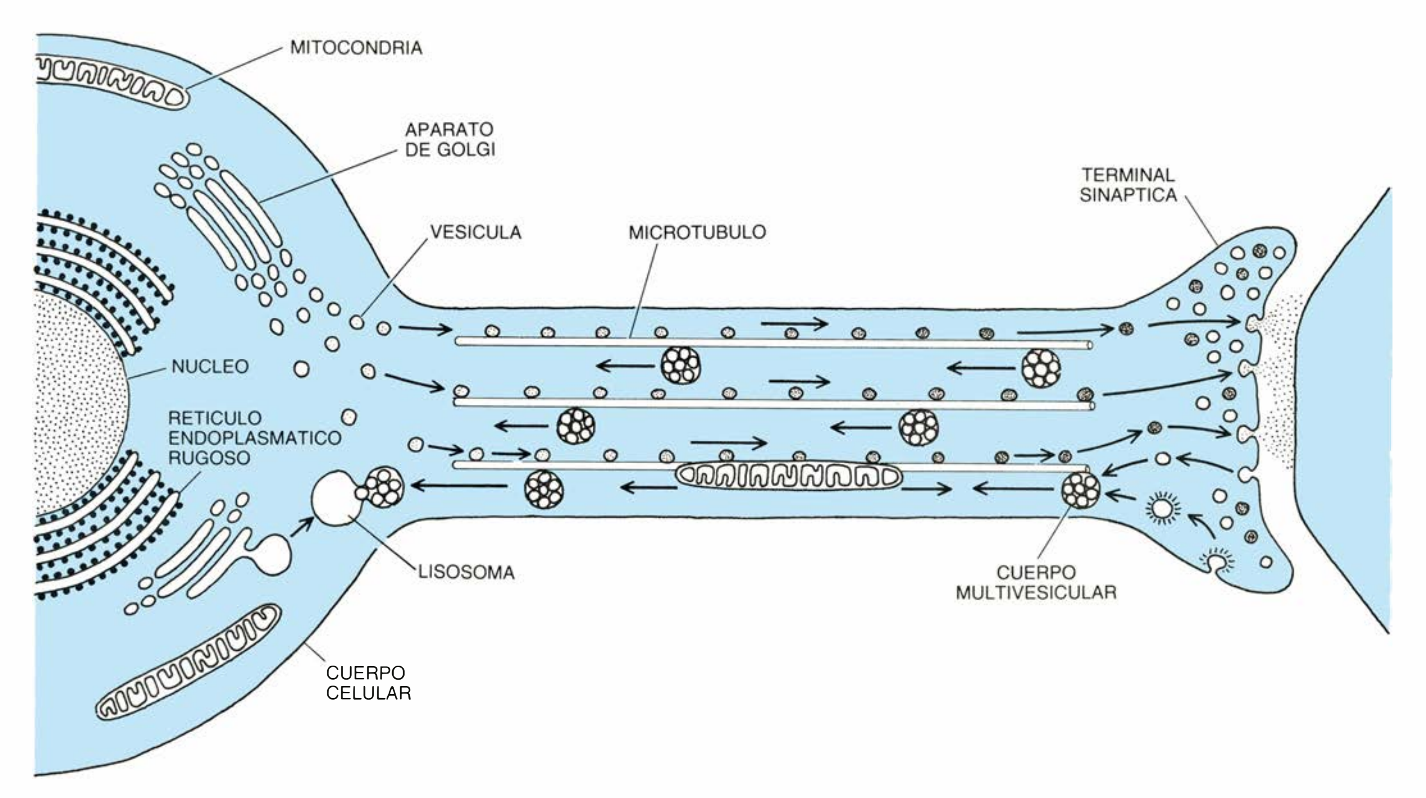
Con una resolución de alrededor de 100 nanómetros no podíamos determinar qué eran los elementos lineales, cuán estrechamente se agrupaban o cuál podía ser su relación exacta con el transporte de partículas. Nos pareció que se respondería mejor a esas preguntas si conseguíamos separar el axón, aislar los elementos y partículas y observar sus interacciones.

Raymond J. Lasek, de la Universidad Case Western Reserve, autoridad reconocida en el campo del transporte neuronal, y Scott T. Brady, uno de sus colaboradores posdoctorales, propusieron la aplicación de una técnica desarrollada en Woods Hole cuatro décadas antes por Richard S. Bear, Francis O. Schmitt y John Z. Young. Habían ideado un método para extraer el axoplasma, o citoplasma axónico, del axón. La porción interior de la neurona se presentaba a modo de cilindro gelatinoso que no se disolvía y que, en consecuencia, mantenía la integridad de su contenido.

Brady aplicó esa técnica y obtuvo un

1 2 3 4

4. MICROSCOPIA AVEC, que saca partido de la propiedad de las cámaras de televisión de detectar los contrastes débiles mejor que el ojo humano. La imagen de AVEC se obtiene amplificando las diferencias de luminosidad y reduciendo la luminosidad de la imagen final. En primer lugar, se adapta una lente zoom a un microscopio óptico (en este caso, de contraste interferencial, o DIC) para potenciar el aumento. Seguidamente se ajusta la imagen DIC para admitir más luz; ese paso mejora la relación señal-ruido y optimiza las condiciones para el uso de la cámara de televisión, pero dificulta la observación de los detalles, porque el exceso de luz deslumbra al ojo. La imagen (*1*) se obtuvo al amplificar la componente de voltaje modulado de la señal de televisión, lo que intensifica las diferencias de luminosidad, y sustraer un voltaje de corriente continua, que corresponde a la luminosidad de fondo. Aunque la intensificación visualiza algunos elementos de la muestra (así las dos vesículas de la mitad superior de la imagen), también se captan partículas de polvo e imperfecciones de las lentes que entorpecen la visión. Puesto que esa pauta moteada persiste al desenfocar la imagen (*2*), puede sustraerse digitalmente del total de la señal de entrada al vídeo, con lo que se obtiene una visión más clara (*3*). Se mejora el contraste de la imagen resultante mediante intensificación digital y se incrementa la relación señal-ruido obteniendo la media de la señal de entrada de unos pocos fotogramas (*4*).



5. TRANSPORTE AXONICO a lo largo de los microtúbulos; permite el intercambio de sustancias entre el cuerpo de la neurona y la terminal sináptica, donde la fibra nerviosa colinda con su célula efectora. Las vesículas que transportan neurotransmisores se fabrican en el aparato de Golgi y se conducen hacia la sinapsis. La membrana sobrante en la terminal sináptica se empaqueta en el interior de estructuras multivesiculares que retornan al cuerpo de la célula, donde los degradan los lisosomas. Las mitocondrias avanzan en ambos sentidos, atendiendo a las necesidades energéticas. El transporte de las vesículas es continuo, mientras que el de mitocondrias es intermitente. Está comprobado que un mismo microtúbulo puede hacerse cargo del transporte en ambos sentidos, pero se ignora el mecanismo de transporte de que se sirve. (El dibujo, de Alan D. Iselin, como el de la figura 8, no respeta las proporciones de escala.)

éxito inmediato. En el axoplasma desprovisto de membrana celular persistía, sin alteración, el transporte que, en presencia de una solución de sales, aminoácidos y la molécula energética ATP, se mantenía durante horas, lo que daba tiempo suficiente para la realización de los experimentos. Propuse que "agitáramos" el axoplasma, para comprobar si el mecanismo de transporte dependía de la integridad de la estructura de aquél. La agitación no detuvo el movimiento de partículas; sencillamente lo desorganizó, sin que las partículas cesaran en su recorrido por el camino tendido por los "elementos lineales". Cada vez me convencía más de que los microtúbulos aislados mantendrían su actividad y justificarían mi confianza en el papel que les atribuía en el transporte de partículas.

Esa convicción se basaba, fundamentalmente, en el trabajo realizado por John H. Hayden, doctorando de mi laboratorio de Darmouth. Hayden obtuvo de los ojos de rana un tipo de células conjuntivas especializadas, los queratocitos, cuyas prolongaciones eran extremadamente delgadas. En ese estrecho ámbito de la célula viva debíamos acudir al AVEC; en efecto, con esa técnica microscópica observamos el avance de partículas en ambos sentidos siguiendo lo que aparentaba ser otro ejemplo de "elementos lineales".

Hayden estudió la composición de tales elementos utilizando anticuerpos antitubulina, proporcionados por Ro-





6. DESLIZAMIENTO Y SERPENTEO de microtúbulos aislados; esos movimientos sugieren que algún tipo de enzima generador de fuerza se relaciona directamente con las fibras. La posición inicial de un microtúbulo determina su trayectoria futura. Cuando topan con un obstáculo, así un orgánulo, colean, se rizan sobre sí mismos o se retuercen en un incesante serpenteo. El movimiento es rápido: estas imágenes AVEC se tomaron con un intervalo de 18 segundos.

bert D. Goldman, de la Facultad de Medicina de la Universidad del Noroeste. Los anticuerpos se fijaron a las fibras, demostrándose así que las sendas fibrosas que seguían las partículas se componían de tubulina y que, por tanto, se trataba de microtúbulos.

¿Impulsaba un mismo microtúbulo los movimientos en los dos sentidos, o sólo en uno? En una segunda serie de experimentos, que exigieron un cuidado supremo en la preparación de las muestras, Hayden se sirvió de la microscopía de vídeo para grabar los movimientos en ambos sentidos a lo largo de los microtúbulos. Preparó los queratocitos para su examen al microscopio electrónico. Al comparar las dos imágenes comprobó que un mismo microtúbulo transportaba las partículas en los dos sentidos. Se trataba de la primera prueba concluyente de que los microtúbulos probulsaban el enigmático movimiento bidireccional que, observado en *Allogromia*, parecía desafiar las leyes de la física. En realidad, creíamos muy verosímil que los microtúbulos estuvieran implicados en todos los sistemas que habíamos estudiado: foraminíferos, células hísticas y neuronas.

La demostración de Hayden puso sobre el tapete otras cuestiones. Cualquier transporte celular dirigido requiere energía química y algún tipo de "enzima transductora", o generadora de fuerza, que convierta esa energía en movimiento. En las células, la fuente común de energía es el ATP, que libera la energía almacenada cuando, en el proceso de hidrólisis, reacciona con una molécula de agua. Suponíamos que el ATP suministraba la energía del transporte microtubular, porque el movimiento de las partículas se interrumpía bruscamente si privábamos a los microtúbulos de esa sustancia. Queríamos averiguar algo más acerca de las enzimas generadoras de fuerza (EGF): su composición, cómo actuaban y si interactuaban con los microtúbulos, con las partículas o con ambos. Para saberlo, necesitábamos aislar y examinar los microtúbulos por separado.

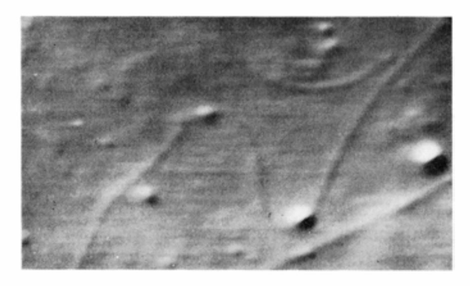
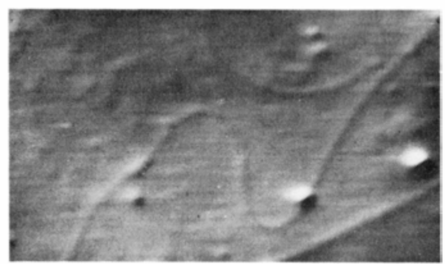
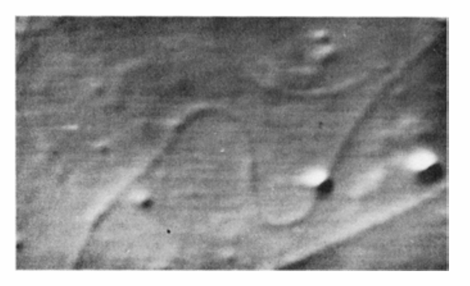
En el verano de 1983, de nuevo en Woods Hole, reanudamos nuestras investigaciones sobre el axoplasma del calamar. Obtuvimos un axoplasma "diluido", cuyos largos microtúbulos se encontraban separados unos de otros. En imágenes AVEC de microtúbulos aislados detectamos los mismos movimientos de partículas que Hayden había observado en el interior de células hísticas intactas. También advertimos que los microtúbulos muy largos (de más de 100 micrometros) eran capaces de modificar su configuración mientras transportaban las partículas, reuniéndose a veces para constituir nudos, lazos, rosquillas y asteriscos.

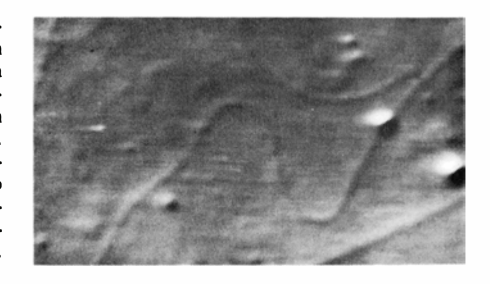
Desgraciadamente, esos ejemplares retorcidos eran tan largos que se salían del campo de visión del microscopio, por lo que no podíamos precisar si colisionaban con objetos inanimados, deformándose por el impacto, o si la interacción con las partículas, la superficie del portaobjetos u otros microtúbulos provocaba su repliegue. Junto con Lasek, Brady y Dean Martz, también del Case Western Reserve, había observado anteriormente que las mitocondrias del axoplasma, desprovisto de membrana celular, del calamar exhibían cambios de forma; éstos daban a entender que de algunas porciones de sus membranas externas tiraban dos, tres o más uniones con los microtúbulos adyacentes. Entre los propios microtúbulos podría darse un tira y afloja similar.

Resultaba imposible decantarse por una de esas opciones hasta que no acertáramos a fragmentar los microtúbulos en segmentos más cortos, técnica que no logramos dominar hasta finales del verano. Un año más tarde, en colaboración con Dieter Weiss, de visita en Woods Hole procedente del Instituto de Zoología de la Universidad de Munich, registramos los movimientos de esos fragmentos. Grabamos unas 45 horas de vídeo, a velocidad normal y aceleradas 10 veces, en este caso por toma fotograma a fotograma. En las cintas se reveló un mundo sutil de movimientos polifacéticos, vivaces e inesperados.

Los hallazgos más espectaculares se obtuvieron, sin embargo, cuando conseguimos fragmentar los microtúbulos, que suelen medir del orden de centenares de micrometros, en segmentos de longitudes que oscilaban entre la anchura del campo visual (25 micrometros) y algo menos de un micrometro. Nos sorprendió el deslizamiento libre





7. MOVIMIENTO BIDIRECCIONAL de partículas en un mismo microtúbulo, representado en una serie de microfotografías AVEC. Una partícula de gran tamaño, probablemente un cuerpo multivesicular, desciende al "valle" del microtúbulo en forma de S y remonta luego la pendiente opuesta. En el tercer fotograma, una partícula menor, alargada, se une a la cima de la "colina" del microtúbulo y parece descender por el lado izquierdo. El intervalo entre las fotografías es de 13 segundos. Los microtúbulos aparecen aumentados 9000 diámetros.

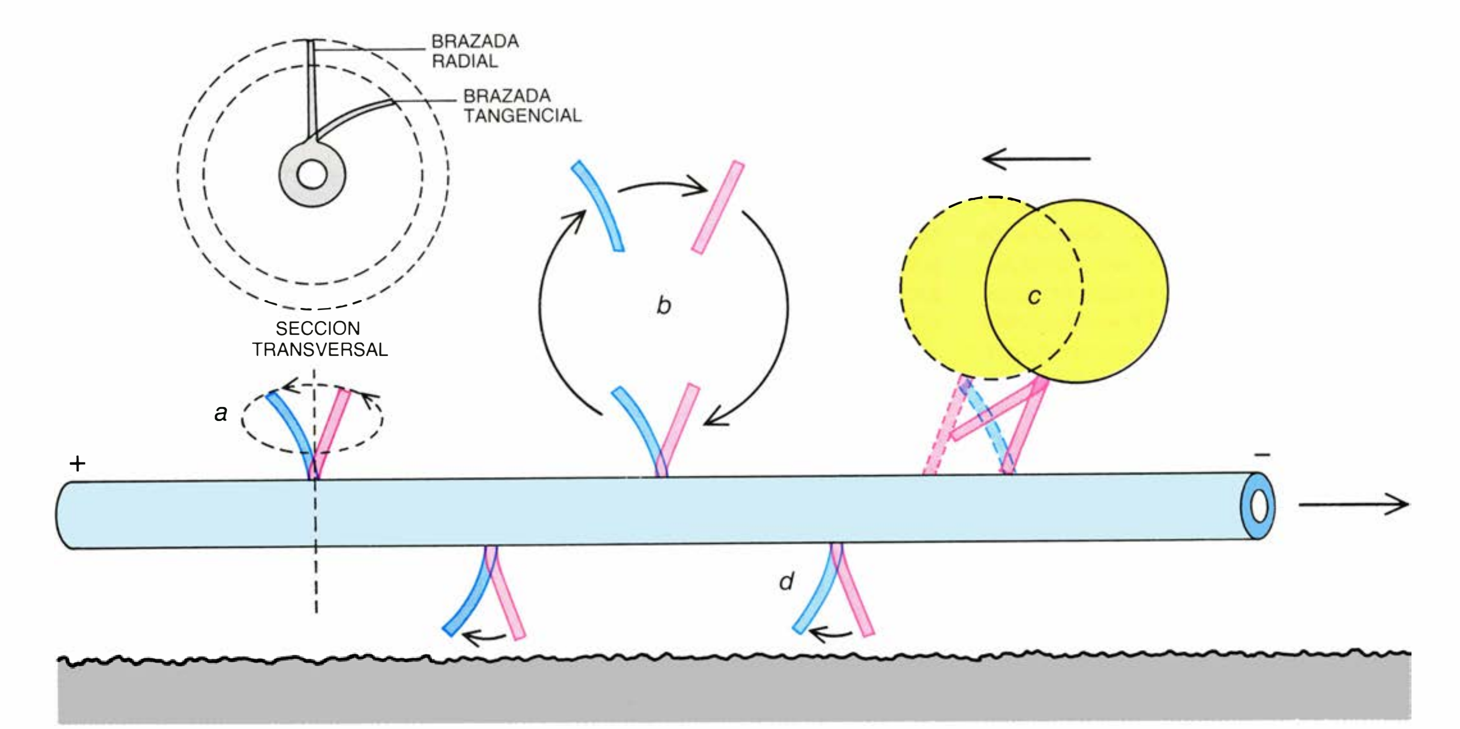
de los segmentos sobre el portaobjetos. Cada fragmento avanzaba sólo en un sentido, sin invertir nunca la marcha, y seguía en línea recta hasta chocar contra un obstáculo, por ejemplo un orgánulo que se hubiera adherido al cubreobjetos. Salía entonces rebotado en cierto ángulo o, si topaba de frente, coleaba en una serie regular de movimientos serpenteantes. Esos culebreos se registraban transportara o no partículas.

Movimientos tan vivaces cuan inesperados iban a ayudarnos a conocer la EGF. Algunos años antes, otros investigadores habían descubierto el modo de ensamblar microtúbulos a partir de subunidades de tubulina purificada [véase "Microtúbulos", por Pierre Dustin; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1980]. Al poco de nuestras observaciones, Thomas S. Reese, del Instituto Nacional norteamericano de Trastornos Nerviosos y de la Comunicación, y sus colaboradores de Woods Hole descubrieron que los microtúbulos reconstruidos no se deslizaban a menos que se añadiera al medio una fracción soluble de axoplasma de calamar.

Esa circunstancia nos llevó a concluir que el lugar de acción de la EGF se encontraba en la superficie del microtúbulo y que en el citoplasma debía haber cierta reserva de EGF. Los hallazgos sugerían también que la asociación de la EGF con el microtúbulo no era íntima. Y así, denominamos a la EGF proteína interactiva con el microtúbulo.

¿Cómo relacionar nuestros descubrimientos con la interpretación más aceptada del mecanismo de transporte axónico? David S. Smith, de la Universidad de Miami, y otros autores habían demostrado, mediante microfotografías electrónicas, que los microtúbulos poseían "brazos" o puentes transversales. Asimismo, se sabía que algunas de las vesículas y orgánulos de los axones neuronales se conectaban con los microtúbulos por medio de puentes transversales de longitud variable. En 1972, Sidney Ochs, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Indiana, propuso que esos puentes estaban formados por una proteína que, modificando su configuración por medio de una reacción que requería energía, desplazaba al orgánulo. Varios autores consideraron que las proteínas contráctiles involucradas podrían ser la actina y la miosina, generadoras de la contracción muscular, pero predijeron que, en cada filamento, el movimiento sería escalonado y se daría en un solo sentido; nuestro grupo había descubierto, por el contrario, que los microtúbulos aislados presentaban movimiento de partículas continuo y también bidireccional.

Nuestros primeros intentos de visualización de los brazos laterales fracasaron, pero Brady y Lasek estaban desarrollando ciertos experimentos que ofrecían mejores perspectivas. Para revelar el mecanismo de transporte microtubular utilizaban AMP-PNP, un análogo del ATP. Esa sustancia sustituye al ATP en el sitio activo de la EGF, pero no se hidroliza ni aporta la energía necesaria para el movimiento. Brady y Lasek sabían que el AMP-PNP producía la adhesión de los orgánulos y vesículas a los microtúbulos y dedujeron que, probablemente, también estabilizaba los brazos laterales. Tratando el axoplasma desprovisto de membrana con dicho análogo, Brady consiguió captar la imagen de los brazos laterales en microfotografías electrónicas. A partir de preparaciones similares, el mismo autor, que en la actualidad se encuentra en el Hospital Clínico de la Universidad de Texas en Dallas, aisló



8. MODELOS DE TRANSPORTE propuestos por el autor, que suponen que el deslizamiento de los microtúbulos y el movimiento de los orgánulos están sometidos al control de la misma molécula: una enzima generadora de fuerza (EGF), que experimenta cíclicamente un cambio de configuración. La EGF reside en los brazos laterales que conectan los microtúbulos con los orgánulos o interactúan con el sustrato. Alterna entre un estado activado (*rojo*) y un estado de reposo (*azul*). La activación a partir del reposo podría registrarse en el propio microtúbulo (*a*), circulando libremente (*b*) o uniéndose a un orgánulo (*c*). El primer modelo es el que mejor se ajusta a la "hipótesis de la brazada", ilustrada en la sección transversal, según la cual las brazadas activadas y de reposo de una EGF proceden en dos orientaciones, una radial y la otra tangencial, de modo que el transporte de partículas en ambos sentidos no provoque su colisión. El último modelo (*c*) describe un mecanismo de movimiento de orgánulos en el que dos o más brazos laterales contiguos coordinan su activación y desactivación para mantener el orgánulo a una distancia fija del microtúbulo. Puesto que los microtúbulos presentan polaridad intrínseca (*indicada por los signos más y menos*), la adhesión de los brazos laterales podría ser direccional; cada microtúbulo se deslizaría en una sola dirección, determinada por su infraestructura (*d*).





9. VESICULAS Y MICROTUBULOS pueden, ambos, presentar los brazos laterales, supuestamente involucrados en el transporte dependiente de los microtúbulos. Cuando se dispone de combustible, en forma de ATP, los brazos se adhieren a la superficie de las vesículas (*izquierda*); sin embargo, cuando el "falso combustible" AMP-PNP sustituye al ATP, los brazos se adhieren a los microtúbulos (*derecha*). En estas imágenes, los brazos laterales, aumentados 210.000 diámetros, se distinguen bien en las vesículas, pero no en los microtúbulos, donde aparecen, muy vagamente, a modo de varillas rígidas entre las grandes estructuras globulares. Las microfotografías electrónicas son obra de George Langford, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Carolina del Norte.

la enzima que hidroliza el ATP, la ATPasa, y que parece constituir un buen candidato a EGF. El grupo de Reese, trabajando en Woods Hole, aplicó el método de Brady, pero obtuvo una proteína diferente.

La inserción de los brazos laterales es también materia de discusión. ¿Constituyen realmente esos brazos los puentes transversales de los microtúbulos, vesículas y orgánulos, o bien se encuentran dispersos libremente en la fase fluida de la célula? Tampoco en esto coinciden las conclusiones a que han llegado distintos investigadores. Según parece, en determinadas circunstancias tanto los microtúbulos como su cargamento pueden unirse a los brazos laterales y, en consecuencia, hemos empezado a plantearnos cuál sería la interacción entre brazos laterales y EGF, responsable de inducir el transporte gobernado por microtúbulos.

Recopilando mi propia experiencia e impresiones en el estudio de ese transporte, desarrollé lo que denomino modelo del "microtúbulo activo nativo". Coincidió ello con mi última instancia en Woods Hole, en 1985. Contaba con la colaboración de Weiss, George M. Langford, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Carolina del Norte, y Dieter Seitz-Tutter quien, junto con Weiss, trabaja en la Universidad Politécnica de Munich. Nuestro modelo proponía que cada brazo lateral contenía una ATPasa transductora que, por hidrólisis del ATP, obligaba al brazo lateral a modificar su configuración, pasando de un estado "activado" a otro "de reposo". Al alterar su configuración, el brazo lateral formaba puentes transversales transitorios entre la vesícula y el microtúbulo o bien interactuaba con una superficie cercana. La fuerza del cambio conformacional de los brazos laterales generado por la hidrólisis del ATP se aprovecharía para mover la vesícula a lo largo del microtúbulo, o para hacer avanzar el microtúbulo a lo largo de una superficie adyacente.

Tanto si los brazos laterales residen inicialmente en los microtúbulos, vesículas y orgánulos como si se encuentran en forma libre, para desencadenar el cambio de configuración juzgamos imprescindible el contacto con un microtúbulo, porque, al parecer, las vesículas nunca se mueven independientes de la superficie del microtúbulo. Nuestro modelo supone también que los brazos laterales se activan antes de su unión con los microtúbulos. El ciclo de cambios de configuración podría ser análogo al mecanismo de que se sirven la actina y la miosina en la contracción muscular, en el que interviene, asimismo, la hidrólisis de ATP.

Se conocen mal los mecanismos e hidrodinámica de la translocación de partículas, pero hemos descubierto en las vesículas algunas estructuras en forma de V (que consideramos parejas de brazos laterales) que dan pie a una interpretación verosímil. Cuando uno de los brazos de las estructuras en V constituyese un puente transversal y atravesara su ciclo de cambio conformacional, el otro se activaría. Al concluir el primero su ciclo y disociarse, se adheriría el segundo, y así sucesivamente. Tal mecanismo "bípedo" evitaría que la partícula se viera arrastrada por el vigoroso movimiento browniano, que constantemente amenazaría su curso. Además, el mecanismo requeriría menos brazos laterales que un modelo que considerara sólo la intervención de brazos laterales de disociación libre.

¿Cómo explica nuestro modelo los movimientos simultáneos de los orgánulos en ambos sentidos? He postulado la "hipótesis de la brazada", un esquema que representa el transporte de partículas en dos sentidos por medio de una única molécula de brazo lateral. Cada brazo se doblaría de tal modo que la brazada activada impulsaría al orgánulo a lo largo de un sendero relativamente distante de la superficie del microtúbulo; posteriormente, en la brazada de vuelta, efectuaría un barrido en redondo, más próximo a la fibra, que transportaría los orgánulos de mayor tamaño en sentido contrario. Las partículas que avanzaran en sentidos opuestos no chocarían entre sí, ya que se situarían en planos de movimiento distintos.

El modelo del microtúbulo activo nativo no es más que una hipótesis; caben otras muchas interpretaciones. Por ejemplo, Reese cree que existen dos tipos de brazos laterales, cada uno responsable de un solo sentido de avance. Puesto que se dispone ya de métodos de visualización del transporte microtubular en el citoesqueleto de células vivas, es probable que en los próximos años desaparezca ese tipo de ambigüedades. Es cuestión de tiempo el que adquiramos un conocimiento mejor del fenómeno que atrajo nuestra atención hace ya muchos años: el tráfico bidireccional intracelular en lo que aparenta ser carretera molecular de sentido único.

Los púlsares más antiguos del universo

Se trata de estrellas densas y compactas que giran sobre sí mismas a razón de cientos de revoluciones por segundo. ¿A qué se debe una rotación tan rápida? Se supone que han revivido tras sufrir una muerte prematura

Jacob Shaham

En una hermosa mañana, a mediados de noviembre de 1982, David J. Helfand, astrónomo de la Universidad de Columbia, entró en mi despacho para contarme un asunto del mayor interés. Acababa de regresar de un viaje profesional al observatorio radiotelescópico de Arecibo, en Puerto Rico. Mientras estaba allí, se enteró de que Donald C. Backer, de la Universidad de California en Berkeley, y sus colaboradores habían descubierto un radiopúlsar de 1,558 milisegundos en la constelación del Can Menor. Esto convertía el radiopúlsar, cuyo nombre oficial es 1937+214, en el más rápido conocido.

El descubrimiento de Backer constituía una noticia sensacional. Los radiopúlsares son objetos celestes semejantes a estrellas, que generan muchas clases de partículas además de radiaciones electromagnéticas. Entre éstas se encuentran las radioondas. Cuando un radiotelescopio apunta a tal fuente, las radioondas se registran en forma de "bips" periódicos. El radiopúlsar más rápido conocido antes del descubrimiento de 1937+214 era el púlsar del Cangrejo: un emisor de pitidos cada 30 milisegundos, oculto en el interior de una estructura grande y mal definida, semejante a una bola de algodón, llamada nebulosa del Cangrejo. Ahora parecía haber algo que emitía pitidos con una frecuencia veinte veces mayor.

Desde el descubrimiento del púlsar del Can Menor, se han identificado otros dos púlsares de pareja rapidez. En 1983, se anunció un púlsar de 6,13 milisegundos (denominado 1953+29) y, en 1986, otro de 5,362 milisegundos (llamado 1855+09). Se habla de un cuarto candidato. A medida que se va acumulando más información, parece cada vez más probable que los púlsares supercéleres recibirán su adecuada explicación en el marco de una nueva clase de púlsares.

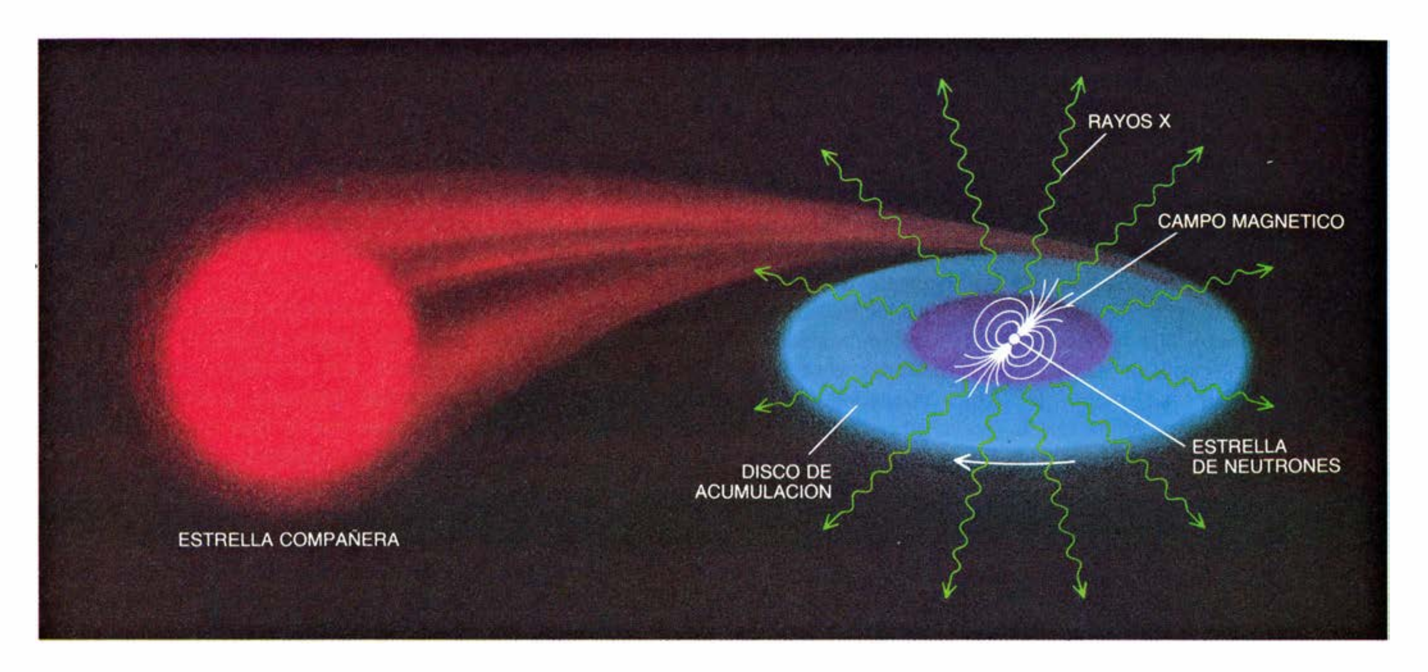
Aunque muchas propiedades de la clase en cuestión permanecen oscuras, van manifestándose algunos hechos generales. El más interesante de ellos quizá sea la avanzada edad atribuida a esos nuevos objetos celestes. Los púlsares ordinarios, bastante jóvenes, no llegan al millón de años; el púlsar del Cangrejo, el más joven de cuantos conocemos, es un niño de 932 años. En comparación, a los púlsares supercéleres se les supone viejos. Son probablemente el resultado de procesos evolutivos que se desarrollaron hace, incluso, mil millones de años, es decir, la vigésima parte de la edad del universo; y entra dentro de lo verosímil que vivan varios miles de millones de años más.

Los radiopúlsares ordinarios entrañan una fascinación particular. Se cree que son estrellas de neutrones en rotación: enormes "núcleos" en giro sobre sí mismos, que contienen unos 10^{57} protones y neutrones. (Recuérdese que el núcleo de un átomo de hidrógeno está constituido por un solo protón y que un núcleo de hierro contiene un total de 56 protones y neutrones.) La estrella de neutrones recibe ese nombre porque alberga unas 20 veces más neutrones que protones. Tamaña aglomeración de materia nuclear, que viene a equivaler a la masa solar, está comprimida en una esfera con un radio del orden de los 10 kilómetros. En consecuencia, la estrella encierra una densidad enorme, ligeramente mayor que la densidad de la materia nuclear ordinaria, la cual es, a su vez, un billón de veces más densa que un ladrillo de plomo.

Las corrientes de protones y electrones que se mueven en el interior de la estrella generan un campo magnético. Al girar la estrella, emerge de ella un radiofaro, alimentado por el efecto combinado del campo magnético y la rotación, que barre periódicamente el espacio circundante, a la manera de un faro. Una vez por revolución, el haz barre la Tierra, dando lugar a los pitidos detectados por los radiotelescopios. El púlsar del Cangrejo, por ejemplo, es una estrella de la misma masa que el Sol, comprimida en una corteza del tamaño de una ciudad mediana y girando a una velocidad elevada: 33 revoluciones por segundo. (Cada 30 milisegundos, el púlsar del Cangrejo efectúa una revolución completa.)

Podríamos pasarnos horas lucubrando sobre las propiedades de una estrella de neutrones. Comenzando, por ejemplo, con un cálculo sencillo: el de la fuerza de la gravedad en la superficie de una estrella de neutrones. Resulta ser unos cien mil millones de veces mayor que la fuerza de la gravedad en la superficie de la Tierra. Tan intenso es el campo gravitatorio que cualquier objeto atraído hacia una estrella de neutrones se fragmentaría ya antes de colisionar con ella: los objetos no pueden caer sobre una estrella de neutrones, sólo pueden "llover" sobre ella.

¿Qué procesos pueden provocar el nacimiento de una estrella tan extraordinaria? Según los astrofísicos, se forma una estrella de neutrones cuando una estrella ordinaria, que tiene una masa varias veces mayor que la solar, colapsa violentamente. El suceso recibe el nombre de supernova. Las partes interiores de una estrella ordinaria implosionan (se contraen violentamente) para formar la estrella de neutrones, mientras que las partes exteriores explosionan para formar una nebulosa circundante, una nube de gas y polvo. Una fracción de la energía ge-



1. UN PULSAR DE MILISEGUNDOS: el 1937+214; se le atribuye un origen distinto del de otros púlsares. Se trata de una densa estrella de neutrones resucitada o reciclada. Hace varias docenas de millones de años, la estrella formaba parte, tal vez, de un sistema binario de rayos X; una estrella de neutrones en rápida rotación, alrededor de la cual se movía una estrella compañera (*arriba*). A medida que las estrellas describían órbitas una en torno a la otra, la de neutrones iba acumulando lentamente masa de su compañera. El impacto de la materia incidente en la superficie de la estrella liberaba rayos X; la estrella comenzó a girar más de prisa. Andando el tiempo, cuando la acumulación se detuvo, y después que la estrella compañera se hubiera despojado de materia "hasta su muerte", la estrella de neutrones giraba sobre sí misma, con rapidez suficiente para convertirse en un radiopúlsar (*abajo*). Aquí, las líneas onduladas rojas representan radioondas; las amarillas, luz visible; las verdes, rayos X, y las azules, rayos gamma. No sabemos por qué desapareció la estrella compañera.

nerada por la explosión se libera en forma de luz visible. El fenómeno adquiere, a veces, proporciones espectaculares. En el año 1054 de la Era Cristiana, por ejemplo, cuando se produjo la supernova que engendró la nebulosa del Cangrejo y su púlsar, el despliegue de luz fue visible durante el día a lo largo de casi tres semanas, y visible por la noche durante más de un año. La energía continúa liberándose después del nacimiento del púlsar: la estrella en rotación expulsa partículas de alta energía que son absorbidas por la nebulosa circundante, emitiendo esta luz difusa. A medida que el púlsar va expulsando partículas, pierde energía de rotación, girando más lentamente. Por regla general, cuanto más antiguo es el púlsar, tanto más lenta es su rotación.

Se podría esperar, por tanto, que los púlsares supercéleres recién descubiertos fueran muy jóvenes, ciertamente más que el del Cangrejo con sus 932 años de edad. A fines de 1982 y a principios de 1983, M. Alí Alpar, del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas de Turquía, Andrew F. Cheng, de la Universidad Johns Hopkins, y Malvin A. Ruderman, de la Universidad de Columbia, se dedicaron, junto con el autor, a analizar los datos del púlsar supercélere 1937+214 recogidos por Backer y sus colegas (S. R. Kulkarni y Carl E. Heiles, de Berkeley, M. M. Davis, del Observatorio de Arecibo, y W. M. Goss, del laboratorio holandés de Kapteyn). Nuestros cálculos, coincidentes con otros, indican que el púlsar está girando de una forma tan rápida que si su velocidad fuera aproximadamente el doble, acabaría destruido por su propia fuerza centrífuga. Estaba claro que, cuando la estrella nació, no podía estar girando mucho más de prisa; por consiguiente, su rotación no podía haberse retardado significativamente.

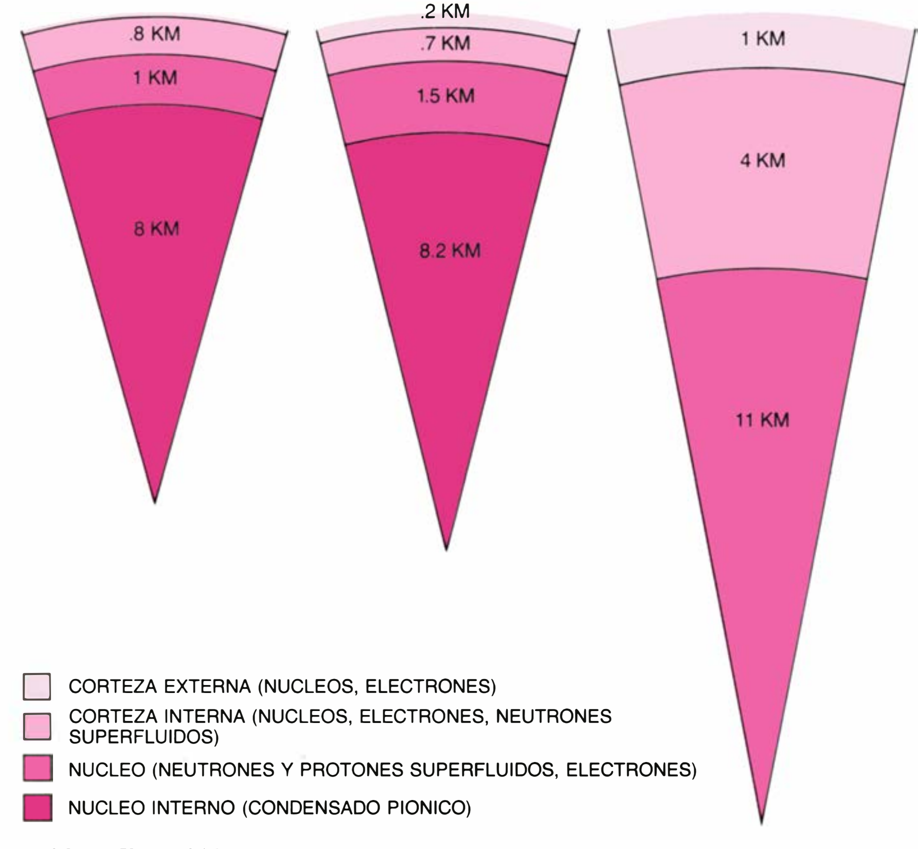
Así las cosas, una razón de índole estadística indujo a concluir que aun cuando el púlsar supercélere mostrara una elevada velocidad de rotación, se trataría, probablemente, de un objeto de gran antigüedad. En otras palabras, por lo que se veía, surgió de un largo proceso evolutivo, y no de una explosión bastante rápida como es la que caracteriza a las supernovas.

La consideración estadística concernía al ritmo de demora de radiopúlsar. En pocas palabras, cuanto más corto es el período de un púlsar, más de prisa se va retardando; cuanto mayor es su período, tanto menos freno sufre. En razón de ello, debería haber más púlsares lentos que céleres. La existencia del púlsar 1937+214 de 1,5 milisegundos implicaba, en el caso de que no constituyera un extraño accidente, que si los púlsares nacían a un ritmo relativamente constante en el tiempo, habría ahora muchos púlsares dotados de períodos largos (entre 10 y 30 milisegundos). Sin embargo, pese a una exploración bastante completa del firmamento, no se han encontrado tales púlsares. Además, aun cuando 1937+214 tenga un período tan corto, apenas si se está retardando. ¿Por qué continúa girando tan de prisa?

Para explicar la discrepancia entre teoría y observación, partimos de un dato: la aceleración a la cual el púlsar se retarda depende también de la intensidad del campo magnético en la superficie de la estrella. Cuanto mayor sea ese campo tanta más energía radiará el púlsar y antes se retardará. Una estrella de neutrones típica tiene un campo magnético de alrededor de un billón de gauss, lo que viene a ser unos 100 millones de veces mayor que el campo de un gran electroimán industrial. Se vio que, si un púlsar de 1,5 milisegundos posee un campo magnético 1000 veces más débil (unos 1000 millones de gauss), podría en principio necesitar un tiempo comparable a la edad del universo para retardarse hasta un período de 10 milisegundos. Esto podría explicar por qué no se han encontrado púlsares en el dominio de 10 a 30 milisegundos: simplemente, no han tenido tiempo de retrasarse.

Algunos cálculos sencillos muestran también que, si el campo magnético de un púlsar es bastante débil, la estrella puede incluso dejar de radiar antes de que se frene apreciablemente. Un púlsar ordinario —es decir, dotado de un campo magnético de un billón de gauss— deja de radiar cuando su velocidad de rotación no alcanza una revolución por segundo. Un púlsar con un campo magnético de 100 millones de gauss, por el contrario, cesará de radiar si su velocidad de rotación es inferior a una revolución cada 10 milisegundos. En otras palabras, aun cuando un púlsar con un campo magnético débil se hubiera retardado hasta 10 milisegundos, dejaría de verse en cualquier caso.

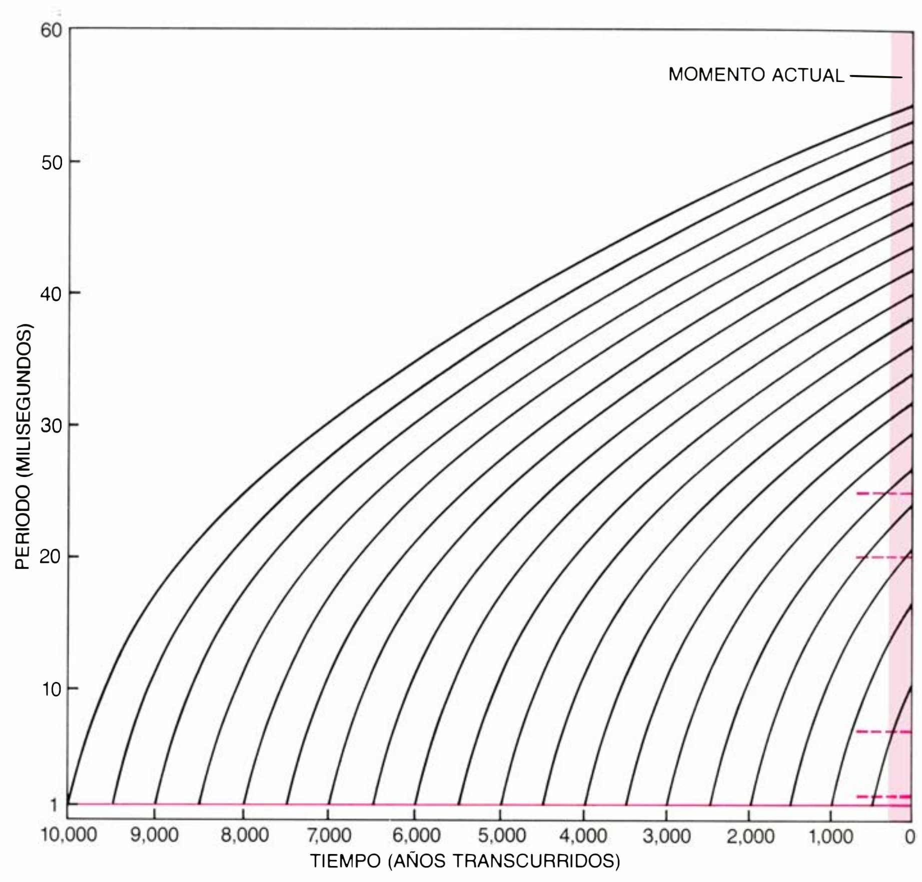
Todas estas consideraciones nos llevan a un notable resultado: la mera existencia del púlsar 1937+214 significa que debe haber una nueva clase de ra-



2. CORTE VERTICAL de una estrella de neutrones según cada uno de los tres modelos teóricos. Una estrella tal está formada por neutrones y protones tan estrechamente comprimidos que su densidad excede incluso la propia de la materia nuclear ordinaria, que, a su vez, es diez billones de veces más densa que un ladrillo de plomo. La estrella representada aquí tiene una masa de 1,4 veces la del Sol; pese a ello, su radio mide escasamente entre 10 y 16 kilómetros, que representa el tamaño aproximado de una ciudad mediana.

diopúlsares —muy diferente de los radiopúlsares corrientes— que presenten débiles campos magnéticos superficiales.

Caer en la cuenta de una nueva clase de radiopúlsares con débiles campos magnéticos quitó al autor y a sus colegas un gran peso de encima. Las observaciones de la radiación procedente de 1937+214 y sus proximidades indican que el púlsar emite poca energía. Por otro lado, si un púlsar ordinario, dotado de un intenso campo magnético, girase con la rapidez de 1937+214, su "tiempo de retardo" (el tiempo requerido para que su período se duplicase) se cifraría en algunos años; la estrella radiaría, además, cantidades ingentes de energía: brillaría varios millones de veces más que el púlsar del Cangrejo. De acuerdo con los cálculos, el púlsar 1937+214, en cuanto adscrito entre los débiles, tiene un tiempo de retardo de casi mil millones de años y su emisión energética es unas 100 millones de veces menor; ello está en buen acuerdo con las observaciones. Nuestra teoría explica, pues, con éxito lo que parecía una abierta discrepancia.



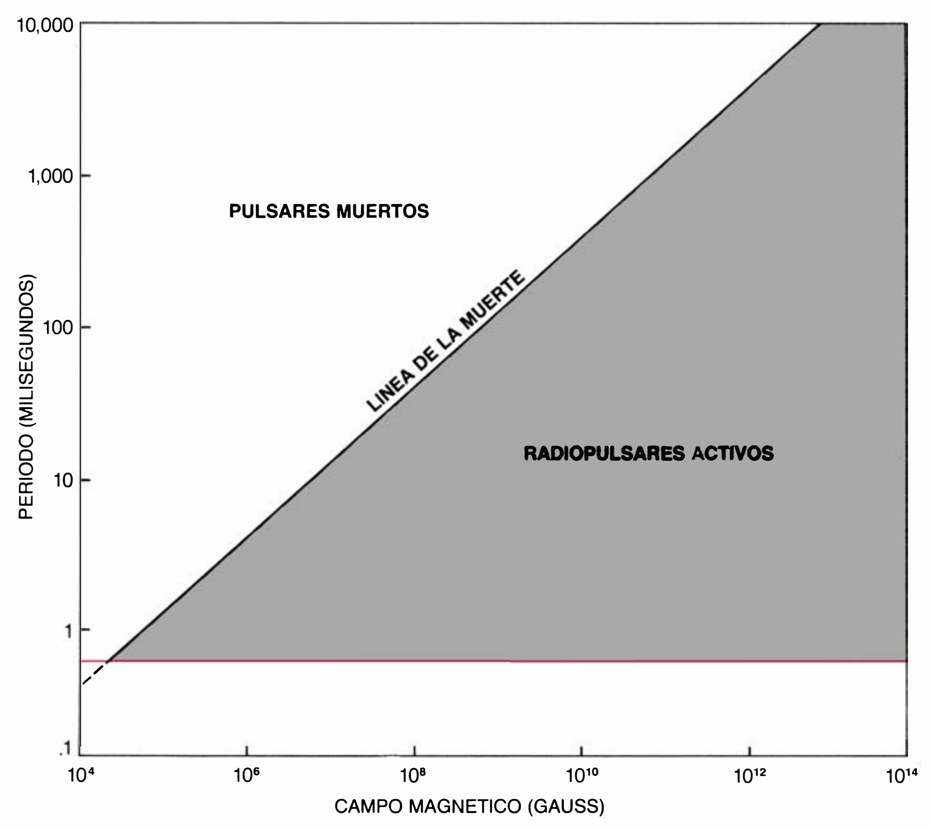
3. **SEGUN LOS RESULTADOS ESTADISTICOS, el púlsar de milisegundos 1937+214 tendría un campo magnético mucho más débil que el de un púlsar ordinario. El gráfico, que se preparó en la hipótesis de que el púlsar de milisegundos presentara un campo magnético de alrededor de un billón de gauss, describe la evolución de una familia de púlsares de milisegundos (*curvas negras*). El espaciado uniforme de las curvas refleja la hipótesis según la cual los púlsares brotarían a un ritmo aproximadamente constante en el tiempo. A medida que un púlsar envejece, su período se dilata: el púlsar se retarda. En general, el período de un púlsar varía a un ritmo inversamente proporcional al valor del período. Dicho de otra manera, cuanto más corto es el período de un púlsar, antes se demora; cuanto mayor es el período, menor es el retardo. En consecuencia, la existencia de púlsares de milisegundos (*grupo inferior de líneas de trazos*) implica que habrá varios púlsares con períodos de 20 milisegundos (*grupo superior de líneas de trazos*). Pero éstos no se han encontrado. Para explicar esa discrepancia se postula que los púlsares de milisegundos tienen campos magnéticos débiles, del orden de mil millones de gauss. Por ser sus campos más débiles que los de los púlsares ordinarios, radian menos energía y podrían necesitar un intervalo de tiempo comparable a la edad del universo para retardarse hasta un período de 10 milisegundos. Podrían incluso "apagarse", es decir, dejar de radiar, para cuando su período fuera de 10 milisegundos. (Esquema realizado por George Retseck.)**

Descubrimos luego una nueva dificultad en nuestro análisis. ¿Cómo podía crearse un púlsar con un campo magnético débil? Ocurrió que, un par de semanas antes de conocer la alta velocidad de giro de 1937+214, atrajo nuestra atención un nuevo trabajo realizado por Roger D. Blandford, del Instituto de Tecnología de California, James H. Applegate, de Columbia, y Lars Hearnquist, de Berkeley. Mostraban que si un púlsar se formaba a alta temperatura —por encima de los 100 millones de grados Kelvin, temperatura que está, en realidad, por debajo de la temperatura característica de una supernova—, el púlsar adquiriría automáticamente un campo magnético intenso. Las consecuencias de su conclusión eran claras: el púlsar 1937+214 se debió formar "frío" (a temperaturas por debajo de los 100 millones de grados), lo que indica que no pudo crearse por una supernova. ¿Por qué? Pues porque una formación "caliente" implicaba un campo magnético intenso y un retardo rápido, lo que resultaba incompatible con un púlsar de 1,5 milisegundos y débil campo magnético.

La única manera conocida de que una estrella de neutrones pudiese girar rápidamente era que acumulase materia en rotación lenta. El fenómeno, en sus líneas esenciales, lo conocerá cualquiera que haya observado la rauda velocidad de giro que alcanzan los patinadores sobre hielo. El deportista comienza girando lentamente con los brazos extendidos; después, los pega al cuerpo, con lo que aumenta la velocidad de rotación. Para que ese mismo proceso tenga lugar en el caso de una estrella de neutrones fría, la velocidad de acumulación de materia debe ser pequeña, pues de lo contrario la estrella se sobrecalentaría y el campo magnético se haría intenso. Así pues, el período de formación del púlsar 1937+214 hubo de durar muchísimo, desde una cota mínima cifrada en los 10 millones de años hasta la más probable de 1000 millones.

La acumulación lenta pudo haberse desarrollado de una de las dos maneras siguientes. Según una hipótesis, una enana blanca (estrella que posee la masa de una de neutrones y un radio mil veces mayor) acumularía materia de una estrella compañera que girase en torno a ella. A medida que la materia se amontonase, la enana blanca colapsaría en una estrella de neutrones. Si el colapso fuera suficientemente lento, la estrella de neutrones podría acelerar su rotación gradualmente y convertirse en un púlsar de milisegundos. Acumulando materia adicional de su compañera, la velocidad de giro de la estrella de neutrones habría aumentado hasta alcanzar un período de equilibrio.

Según la otra posibilidad, se formaría primero una estrella de neutrones, y lo haría de la manera habitual: mediante una supernova; se comportaría como un púlsar normal. Unos 10 millones de años después, se habrían atenuado la mayoría de las corrientes eléctricas superficiales, dejando un pequeño campo magnético. Si el púlsar "muerto" tuviera una estrella compa-



4. LOS RADIOPULSARES "se apagan" cuando su campo magnético superficial es demasiado débil o su período de rotación demasiado largo. En el diagrama se ilustra el límite entre los radiopúlsares activos y los "muertos", para distintos períodos e intensidades del campo diversas. Puesto que una estrella de neutrones se destruiría si su período fuese inferior a un milisegundo, el campo superficial de un púlsar activo se cifrará, al menos, en 100.000 gauss, lo que viene a equivaler a unas 10 veces el campo de un imán potente.

ñera en órbita muy cerrada en torno a él, podría haber acumulado lentamente la materia necesaria para adquirir una rápida rotación y resucitar o reciclarse. Tanto en esta hipótesis como en la anterior, la estrella compañera habría de inmolarse en el proceso, ya que no se observa ninguna estrella compañera en la vecindad de 1937+214.

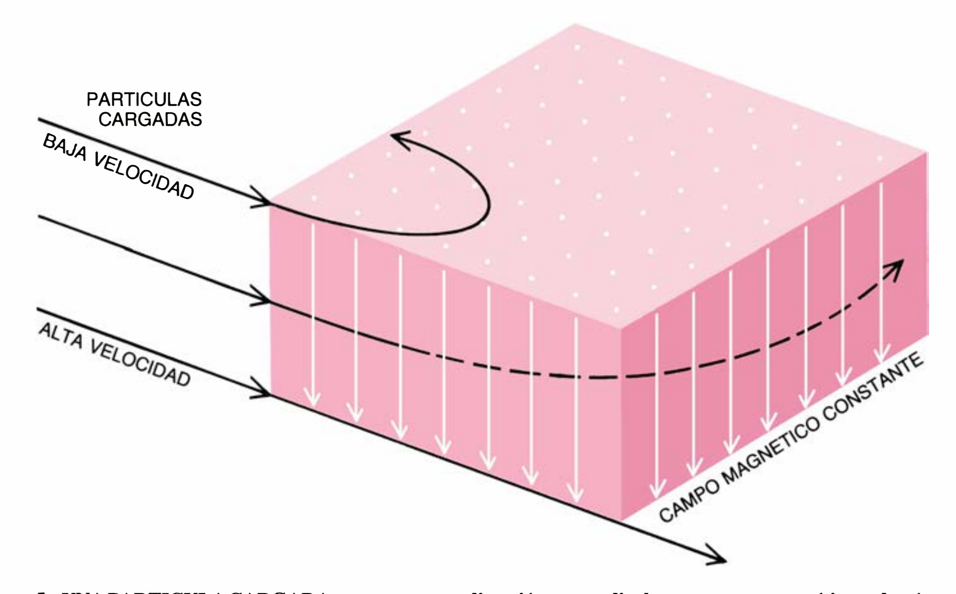
Ambas hipótesis comportan, implícito, un fenómeno común que evita la acumulación precipitada. A medida que los electrones, átomos y moléculas incidentes van chocando contra la superficie de la estrella, parte de su energía se transforma en luz y otras radiones electromagnéticas. La radiación se propaga hacia afuera, alcanzando otros electrones, átomos y moléculas incidentes. Como la radiación transporta cantidad de movimiento, ejerce una fuerza sobre la materia incidente. La fuerza de la radiación está dirigida hacia fuera y se opone, por tanto, a la atracción gravitatoria de la estrella.

Si la velocidad de acumulación alcanza un valor suficiente (6×10^{17} gramos por segundo, unas 10^{-8} masas solares por año), la fuerza de la radiación crecerá hasta equilibrar la atracción gravitatoria impidiendo que la velocidad de acumulación aumente más. La velocidad de acumulación a que ambas fuerzas se equilibran se llama límite de Eddington, en honor del astrónomo británico Sir Arthur Eddington. En términos sencillos, el límite de Eddington significa que cualquier proceso de acumulación sobre una estrella de neutrones posee un termostato incorporado que asegura que la velocidad de acumulación no alcance nunca valores excesivos. Si hay suficiente materia disponible para la acumulación, la velocidad de deposición tampoco decrecerá en demasía. El termostato parece construido a propósito para la fabricación de púlsares de milisegundos, porque limitar la velocidad de acumulación significa limitar la temperatura estelar a 100 millones de grados o menos.

Se sabe ya que tal proceso de acumulación regulada desempeña un importante papel en la formación de "fuentes compactas de rayos X", que son pequeñas estrellas de neutrones giratorias que emiten rayos X. Ciertas fuentes compactas de rayos X se llaman binarias de rayos X de baja masa; en ellas, la estrella de neutrones amontona masa de una estrella compañera ligera. La acumulación puede durar 100 millones de años o más.

Períodos de acumulación tan largos en las binarias de rayos X de baja masa planteaban una interesante cuestión: ¿podrían ser los progenitores de los púlsares de milisegundos? Nos pareció que, simplemente, tenían que serlo. En efecto, tanto la hipótesis de la enana blanca como la del púlsar muerto requieren una estrella binaria que suministre materia acumulable durante mucho tiempo; el único candidato conocido es la estrella binaria de rayos X de baja masa.

Argumentaciones de índole estadística parecen apoyar la idea de que las



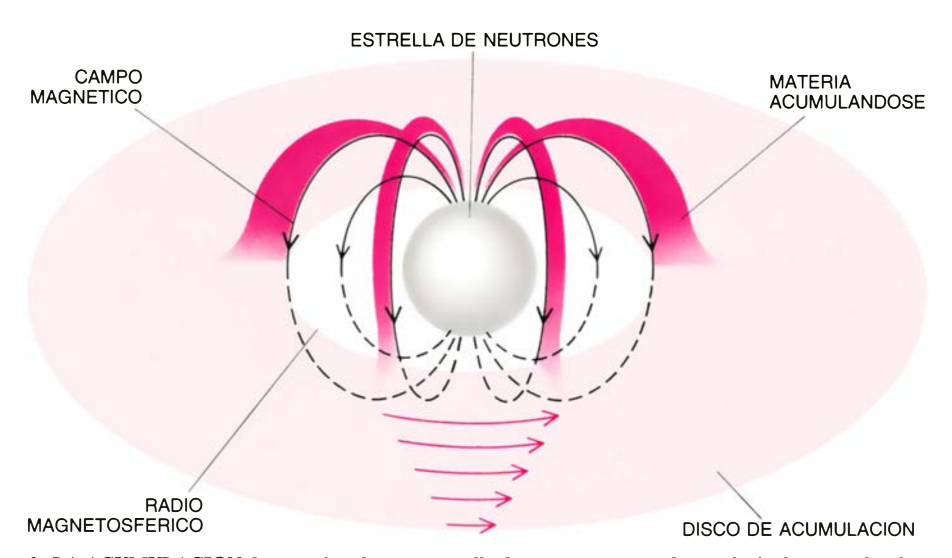
5. UNA PARTICULA CARGADA que se mueva en dirección perpendicular a un campo magnético se desvía debido a la llamada fuerza de Lorentz, de tal manera que "le gustaría" describir una circunferencia. Mientras el campo magnético sea débil y la velocidad de la partícula alta, la desviación no revestirá importancia (*abajo*). A medida que aumente el cociente entre intensidad de campo y velocidad, se producirían desviaciones progresivamente mayores (*centro*), hasta que el campo termine por retrotraer la partícula (*arriba*).

binarias de rayos X de baja masa son los antecesores de los púlsares de milisegundos. Para introducirnos en el razonamiento, comenzaré con un caso sencillo. Supongamos que todos los seres humanos vivieran 80 años. Llamaremos niños a quienes no hayan cumplido los 10 años; adultos, a todos los demás. En promedio, ¿cuál debería ser la relación de adultos a niños? Evidentemente, debería haber siete adultos por cada niño, ya que cada adulto cubre siete veces la duración de la vida de un niño.

Volviendo a las estrellas, los púlsares de milisegundos (los "adultos") deben tener una vida muy larga antes de extinguirse; para simplicidad del cálculo, admitiré que viven 20.000 millones de años, que es la edad del universo. Las binarias de rayos X de baja masa (los "niños") tienen una vida estimada, en comparación, relativamente corta, de unos 100 millones de años. La estadística indica ahora que la relación de púlsares de milisegundos a binarias de rayos X de baja masa debería ser, aproximadamente, de 20.000 millones a 100, es decir, de 200 a 1.

La conclusión teórica concuerda con las observaciones. Recordé antes que se han descubierto ya tres púlsares de milisegundos. Irán identificándose más, ciertamente. Resulta, pues, razonable esperar que haya varios miles de púlsares de milisegundos surcando la galaxia, que se hurtan a nuestra detección. (Los púlsares no pueden verse desde la Tierra, a menos que estén suficientemente cerca.) Por tanto, cabría esperar que hubiese algunas docenas de binarias de rayos X de baja masa en la galaxia; y eso es precisamente lo que se encuentra.

Las consideraciones estadísticas son naturalmente alentadoras, pero reviste mayor importancia poder trabajar sólo con principios fundamentales de física para elaborar un modelo que predice con gran aproximación la velocidad de variación de la rotación del púlsar 1937+214. De acuerdo con esa teoría, 1937+214 es un radiopúlsar resucitado. Comenzó como binaria y se fue acelerando por acumulación de masa. Cuando ésta se detuvo, la estrella presentaba una velocidad de rotación suficiente para convertirse en un radiopúlsar, a pesar de su campo magnético, bastante débil. Se determinó que su período debía aumentar al ritmo de 10^{-20} a 10^{-19} segundos cada segundo, muchos órdenes de magnitud inferior a lo que podría esperarse para cualquier púlsar rápido conocido antes de 1982.



6. LA ACUMULACION de materia sobre una estrella de neutrones se produce principalmente sobre los casquetes polares; allí es donde comienzan y terminan la mayor parte de las líneas del campo magnético. Las partículas cargadas que se mueven paralelamente a las líneas del campo no se desvían y tienden a acumularse en los polos. Sin embargo, las partículas cargadas que se mueven perpendicularmente a las líneas del campo se desvían, aunque las colisiones con otras partículas incidentes les impiden volver atrás. El punto donde las partículas tienden a detenerse se llama radio magnetosférico. En la región interior al mismo, la "magnetosfera", las partículas corren, principalmente, a lo largo de las líneas de campo y giran con la estrella.

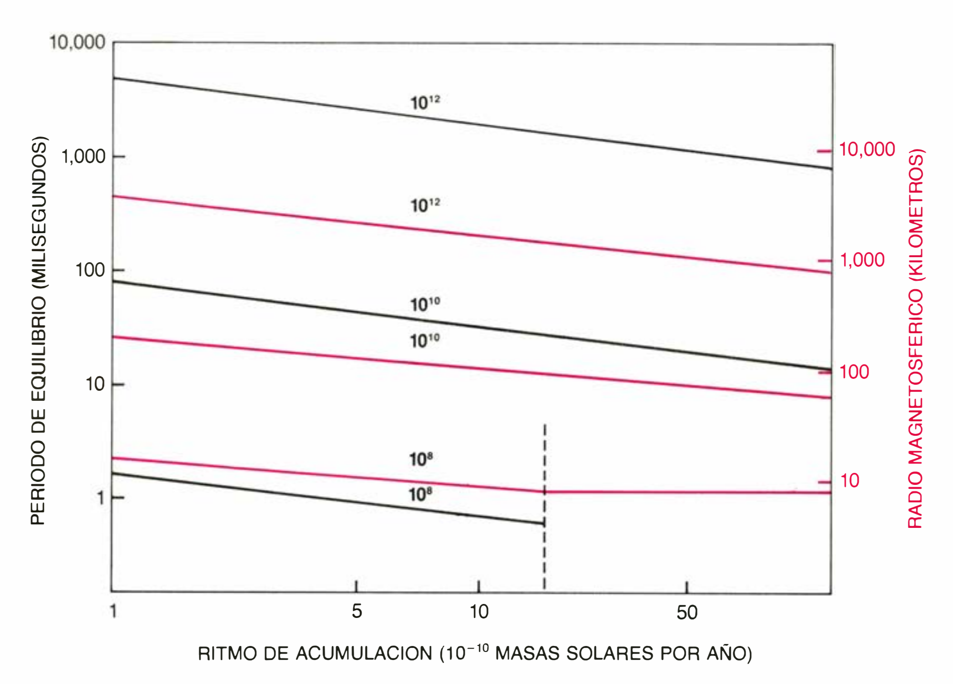
Nuestra predicción se ha confirmado: el valor medido del ritmo al cual aumenta el período es de $1{,}24 \times 10^{-19}$ segundos cada segundo, con un error de $0{,}25 \times 10^{-19}$ segundos por segundo.

No se ha corrido todo el velo del misterio que rodea a 1937+214. Si el púlsar se aceleró por acumulación, ¿dónde está la estrella compañera? La pregunta se tornó más embarazosa en 1983, con el descubrimiento del púlsar 1953+29, de 6,133 milisegundos (por Valentin Boriakoff, de la Universidad de Cornell, R. Buccheri, del Consejo Nacional de Investigación de Italia, y F. Fauci, de la Universidad de Palermo); éste sí tiene una compañera binaria.

Poco después del descubrimiento, Helfand, Ruderman y el autor se empeñaron en la búsqueda del motivo por el que 1953+29 formaba parte de un sistema binario mientras que 1937+214 se manifestaba aislado. Hicimos uso de la existencia de dos clases de binarias de rayos X de baja masa: las brillantes y las débiles. Las brillantes sólo pueden explicarse interpretándolas como una estrella "normal" que se dilata, convirtiéndose en gigante roja, y que posteriormente pierde su capa más externa de materia, que va a parar a una estrella de neutrones compañera. En cambio, una binaria débil podría producirse si dos estrellas se aproximasen cediendo energía orbital a la radiación gravitatoria.

En los últimos cinco años, más o menos, varios investigadores han mostrado que si una binaria brillante de rayos X y baja masa da nacimiento a algo, sólo puede ser un sistema binario: en este caso, un púlsar y el núcleo residual de la estrella "normal". (Entre los investigadores que llegan a esta conclusión merecen citarse Paul C. Joss y Saul A. Rappaport, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, Edward P. J. van den Heuvel y G. J. Savonije, del Instituto Astronómico de Amsterdam, Ronald E. Taam, de la Universidad Northwestern, y Ronald F. Webbink, de la de Illinois en Urbana-Champaign.) Supusimos, por tanto, que 1953+29 pudo haberse iniciado como binaria brillante de rayos X y baja masa, mientras que 1937+214 pudo haber sido originariamente una binaria débil de la misma clase.

La situación se volvió más compleja en 1986, con el descubrimiento del púlsar 1855+09, de 5,362 milisegundos (por D. J. Segelstein, L. A. Rawley, D. R. Stinebring, A. S. Fruchter y Joseph H. Taylor, de la Universidad de Princeton), que presentaba también una compañera binaria. La historia de 1855+09 y la de 1953+29 parecen, en principio, muy semejantes, entre sí y comparadas con las de otros cinco púlsares binarios que, sin ser supercéleres, poseen períodos de varias decenas de milisegundos. Que 1937+214 carezca de compañera comienza a resultar bastante llamativo. Se han propuesto diversos sistemas de hipótesis para explicar cómo pudo desaparecer la compañera (entre ellos, al menos uno que supone el púlsar relativamente joven, de



7. PERIODO DE EQUILIBRIO y radio magnetosférico, en función de la velocidad de acumulación para distintas intensidades del campo magnético. Por período de equilibrio se entiende aquel en que la materia del radio magnetosférico gira con la estrella. Los cálculos pertenecen a una estrella de 1,4 masas solares.

alrededor de un millón de años). Hasta hoy, sin embargo, ninguna de ellas ha tenido éxito completo; y continuamos en la búsqueda de una explicación satisfactoria.

Tal vez el eslabón perdido más importante de nuestra historia era, y sigue siendo, el hecho de que ninguno de los sistemas binarios de rayos X y baja masa observados ha mostrado, hasta ahora, una estrella supercélere de neutrones como miembro del par. De hecho, si una estrella binaria de rayos X y baja masa ha de dar nacimiento a un púlsar supercélere, sería de esperar que contuviera una estrella de neutrones que girara con un período de algunos milisegundos. ¿Por qué no se han observado tales periodicidades?

Varias razones vienen en seguida a la mente. La más plausible corresponde al hecho de que cualquier estrella de neutrones que se encuentre formando parte de un sistema binario de rayos X y baja masa debe ser probablemente muy antigua. Su campo magnético constituirá, por tanto, una reliquia de otro campo anterior y más intenso, que es precisamente lo que hace falta para obtener períodos de milisegundos por un proceso de acumulación. David S. Eichler y Zhengzhi Wang, de la Universidad de Maryland en College Park, han mostrado que la intensidad del campo magnético residual varía ampliamente de unos puntos a otros de la superficie. Así pues, mientras que una estrella de neutrones ordinaria tiene dos puntos magnéticos activos de rayos X (los casquetes polares, de los que emanan los rayos X), una estrella de neutrones antigua puede tener muchos puntos activos de rayos X en su superficie.

Si la estrella gira y se enfoca hacia ella un telescopio de rayos X, los puntos activos aparecerán como variaciones de la intensidad de los rayos X. No obstante, las variaciones no serán muy intensas o bruscas; aparecerán como fluctuaciones erráticas a frecuencias mucho más altas. Aun cuando la variación de la intensidad se repetirá en cada revolución estelar, estará tan enmascarada que el período, y consiguientemente la propia estrella giratoria, pueden escaparse a la detección ante el ruido de fondo de rayos X de dicha fuente.

Otros efectos podrían intervenir y dificultar la detección de la supuesta rotación de la estrella de neutrones de un sistema binario de rayos X de baja masa. La materia de la estrella compañera que se acumula podría difundir los rayos X procedentes de los puntos activos, menguando así el grado de modulación. Además, la estrella de neutrones actúa, probablemente, como "lente gravitatoria": desvía los rayos X procedentes de ella, con lo que todavía el grado de modulación se reduciría todavía más.

Aun cuando todas ésas sean consideraciones de peso, el autor se sentiría más a gusto si se observara una estrella de neutrones en rotación rápida en una binaria de rayos X de baja masa. En 1983, la Agencia Espacial Europea lanzó el *EXOSAT*, satélite de observación de rayos X, en órbita alrededor de la Tierra. Uno de los experimentos del satélite consistía en explorar sistemáticamente períodos muy cortos de rayos X en binarias de rayos X y masa escasa. A pesar de no encontrar un período único bien definido, se observaron algunas cuasi-periodicidades, o fluctuaciones intermitentes de radiación, en la fuente galáctica GX5-1. El intervalo de tiempo entre "brotes" variaba de 25 a 50 milisegundos.

Las cuasi-periodicidades presentan propiedades poco corrientes, como Michel van der Klis, de la Agencia Espacial Europea y sus colaboradores (F. Jansen, del Laboratorio de Investigación Espacial, J. van Paradijs y M. Sztajno, del Instituto Astronómico de Amsterdam, J. Trümper, del Instituto Max Planck de Física y Astronomía de Munich, y W. H. G. Lewin, del MIT y del Instituto Max Planck) informaron en la circular N.º 4043, de 13 de marzo de 1985, de la Unión Astronómica Internacional y, subsiguientemente, en *Nature*. En primer lugar, las cuasi-periodicidades no son constantes, sino que muestran gran variabilidad. La intensidad de la señal cuasi-periódica es máxima en los cuasi-períodos más largos observados y decae siempre para períodos más cortos. El rasgo más intrigante del fenómeno estriba en que la luminosidad total de GX5-1 guarda una relación directa con la duración del período: cuanto más corto es éste, tanto mayor es el brillo de la fuente.

Varias semanas antes de que saliera la circular de la UAI, Alpar, que estaba entonces en Illinois, llamó para informarme de ello. Un amigo suyo de Europa había asistido a un seminario sobre los descubrimientos; comenzaron a propagarse distintos rumores. Por extraños que parecieran, los descubrimientos tenían todos los visos de ser auténticos. Nosotros sabíamos que contenían una pista importante para nuestro dominio de los púlsares supercéleres. Trabajamos con ahínco en la elaboración de un modelo que diera cuenta de las observaciones.

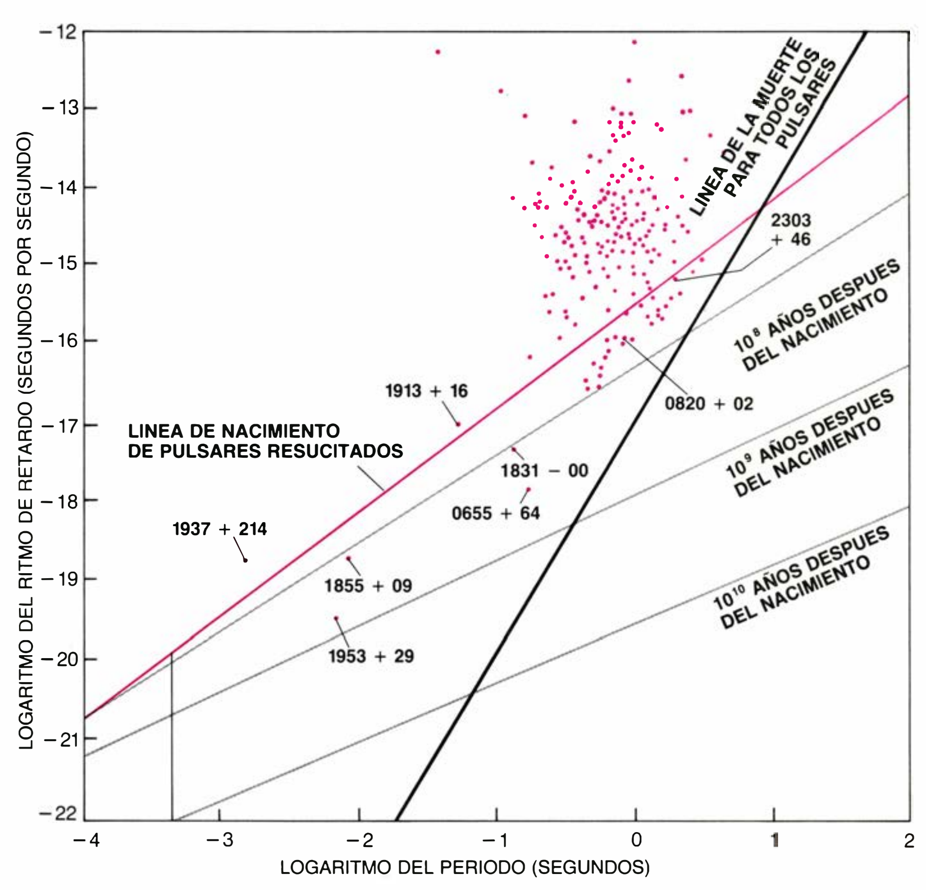
De acuerdo con éste, las cuasi-periodicidades venían causadas por la materia que giraba en torno a la estrella de neutrones e intentaba "engancharse" al campo magnético que, naturalmente, gira con la estrella. Los "brotes" se producen con una frecuencia igual a la diferencia entre la frecuencia orbital de la materia que se acumula y la frecuencia de rotación de la estrella. La diferencia en los ritmos

de frecuencias orbitales conduce a un comportamiento cuasi-periódico, no a un comportamiento bien definido. Según dicho análisis, GX5-1 debía girar sobre sí mismo con un período de 6 a 10 milisegundos y tener un campo magnético superficial de unos mil millones de gauss. Fue emocionante, pues ambos valores estaban muy próximos a los del púlsar binario 1953+29.

Las noticias eran magníficas. Por fin había una indicación clara de una periodicidad de milisegundos dentro de una fuente activa de rayos X y baja masa. El rompecabezas de la formación de púlsares de milisegundos comenzaba a encajar.

La astronomía de rayos X se vio inmersa en un torbellino con el descubrimiento de la fuente cuasi-periódica de rayos X GX5-1, denominado hoy, con mayor generalidad, oscilador cuasi-periódico. Se ha descubierto ya una decena larga de osciladores cuasi-periódicos, de los que siete muestran períodos cortos (de 25 a 250 milisegundos). Los siete están asociados con binarias de rayos X y escasa masa, altamente luminosas. El comportamiento totalmente regular de GX5-1 se ha convertido en una especie de zoo de fenómenos en los otros osciladores cuasi-periódicos. Evidentemente, las complicaciones desencadenarán, en los años venideros, ulteriores discusiones y modelos para los osciladores cuasi-periódicos y los púlsares de milisegundos.

Queda todavía mucho por hacer. Pero estamos asistiendo a un fascinante cuadro de la resurrección de púlsares supercéleres de larga vida a partir de antiguas estrellas de neutrones. El cuadro nos ofrece una nueva perspectiva para algunos de los sistemas estelares más antiguos de la galaxia. Los púlsares han instado nuevos planteamientos en campos tales como la física de partículas, la física nuclear, la del estado sólido y la del plasma y los superfluidos, así como en electromagnetismo y relatividad general. Ahora, los púlsares más antiguos iluminan el camino de evolución de la galaxia.



8. RITMOS DE RETARDO observados en diversos púlsares; se representan aquí en función de sus períodos. La mayoría de los púlsares residen en la región superior derecha del diagrama. Simbolizan la clase típica de púlsares creados durante una supernova: la explosión de una estrella. A medida que los púlsares envejecen, se van moviendo hacia abajo y hacia la derecha hasta alcanzar la "línea de la muerte" (*véase la figura 4*). Se han encontrado seis púlsares que caen fuera del grupo principal. Estos (y otros dos que están en el grupo principal) pertenecen a una nueva clase de púlsares que se aceleraron en un lento proceso de acumulación de materia. Todos los miembros de la nueva clase, que se identifican por su nombre, caen encima de la línea de la muerte. Y todos, salvo 1937+214, tienen compañeras binarias. Las líneas en rojo y en gris representan varias fases en la vida de los púlsares que se aceleraron a un ritmo de acumulación de 10^{-9} masas solares por año. La línea indica el período más corto que puede desarrollar una estrella de neutrones sin destruirse.

Ciencia y sociedad

Natalicios

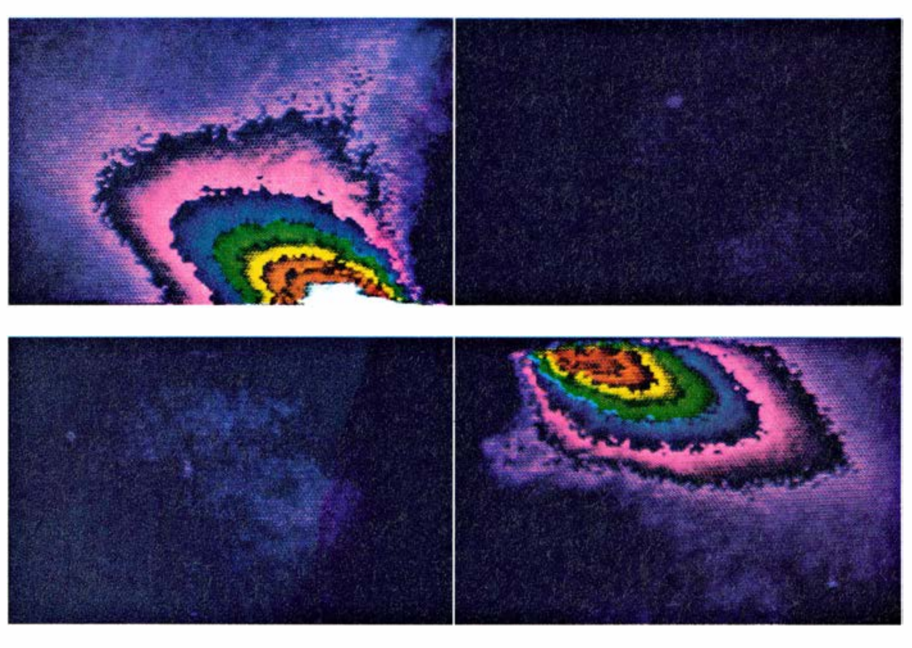
En la 169ª reunión anual de la Sociedad Americana de Astronomía se anunció lo que parecen ser los nacimientos de un sistema planetario y de una galaxia. También se apuntó el descubrimiento de un nuevo tipo de objeto astronómico.

Francesco Paresce y Christopher Burrows, astrofísicos de la Agencia Espacial Europea adscritos al Instituto Científico del Telescopio Espacial, de la NASA, han presentado "la prueba más concluyente hasta la fecha" de que una estrella cercana quizá se encuentre rodeada por un sistema planetario o protoplanetario. Se trata de Beta Pictoris, estrella situada a unos 53 años-luz del sistema solar.

Hace dos años, analizando la radiación próxima al infrarrojo que emana de Beta Pictoris, Bradford Smith y Richard Terrile descubrieron un disco de materia relativamente fría que ceñía a la estrella. Paresce y Burrows obtendrían ulteriormente una imagen óptica cabal de la estrella en el Observatorio Meridional Europeo instalado en La Silla, Chile.

Encontraron que el disco reflejaba por un igual todas las longitudes de onda de la luz de Beta Pictoris, señal de que en el disco había partículas de diámetro superior al micrometro, o, cuando menos, diez veces mayores que el polvo que suele mecerse por el espacio interestelar. El polvo de diámetros inferiores al micrometro reflejaría las longitudes de onda cortas, de luz azul, que conferiría al disco una apariencia gris azulada. Según Burrows, los datos no fijan un límite superior al tamaño de las partículas. "Quizá se esté produciendo un proceso de aglomeración, afirma, que podría haber creado ya cuerpos del tamaño de un planeta, si bien no se dispone aún de pruebas en ese sentido."

Astrónomos de la Universidad de California en Berkeley, el Centro Harvard-Smithsoniano de Astrofísica y la Universidad de Arizona han descubierto lo que parece ser una galaxia en pleno trance de alumbramiento. Valiéndose del VLA del Observatorio Nacional estadounidense de Radioastronomía y de varios telescopios ópticos, el grupo localizó un objeto luminoso de tamaño triple que el de la Vía Láctea y situado a una distancia de alrededor de 12.000 millones de años-luz, lo que le coloca entre los objetos más distantes, en el espacio y el tiempo, del universo visible.



1. DISCO DE PARTICULAS que rodea a Beta Pictoris, estrella situada a 53 años-luz de la Tierra. En la obtención de esta imagen, los astrónomos, del Observatorio Meridional Europeo, restaron electrónicamente la imagen de una "estrella de referencia" que guarda parecido con Beta Pictoris de la imagen de esta última. Las líneas blancas representan condensación de la imagen. La intensaidad de la luz se expresa por medio de una escala de falsos colores: la luz más débil aparece violeta y, la más intensa, roja.

El análisis de la luz procedente del objeto, denominado 3C 326.1, ha permitido a los científicos determinar que la mayor porción de la radiación —el equivalente a unos 10.000 millones de soles— emana de una nube de hidrógeno ionizado; una cantidad muy inferior, equivalente a unos 100 millones de soles, llega de las estrellas. Tamaña desproporción sugiere, en opinión de los autores, que la nube es una "galaxia joven o en formación". Sin embargo, señalan asimismo que 3C 326.1 emite la ingente cantidad de radioenergía que suele acompañar a los agujeros negros. De hecho, lo primero que atrajo la atención de los observadores fue precisamente esas intensas ondas de radio. En su mayoría, los teóricos consideran que los agujeros negros no aparecen hasta las postrimerías de la vida de las galaxias.

Vahe Petrosian, de la Universidad de Stanford, y Roger Lynds, de los Observatorios Opticos Nacionales de los Estados Unidos, parecen haber localizado una estructura cósmica enteramente nueva. Desde el Observatorio Nacional de Kitt Peak descubrieron tres amplios arcos luminosos que rodeaban parcialmente una gran galaxia situada en el centro de tres cúmulos galácticos. Uno de los arcos se muestra fragmentado en secciones; los otros no evidencian solución de continuidad, lo que haría de ellos, según los autores, las mayores estructuras luminosas jamás observadas.

Petrosian y Lynds proponen que los arcos, que emiten la luz azulada propia de las estrellas jóvenes, quizá representen el frente de una onda de choque que se expande a partir de una explosión de la potencia de millones de supernovas; otra teoría postula que los arcos los forman estrellas expulsadas de una galaxia por una intensa fuerza gravitatoria, como la que podría ejercer otra galaxia o un agujero negro. Si bien los arcos se encuentran en puntos distintos del firmamento, todos distan de la Tierra unos 5000 millones de años-luz. Postula Petrosian que tal coincidencia podría indicar que "esos objetos existieron hasta cierta época y

después se desintegraron". Y añade: "Creo que, si buscamos más allá, hallaremos otros".

¿Caos cuántico?

El tiempo que disfrutemos mañana, como la desintegración radiactiva de un átomo, sólo puede describirse en términos de probabilidad. Dos factores muy distintos contribuyen a la incertidumbre que oscurece el curso de esos fenómenos. La naturaleza caótica, o estocástica, de sistemas macroscópicos como el de la atmósfera deriva en gran parte de los innumerables y abrumadores efectos que, a lo largo del tiempo, provocan las pequeñas fluctuaciones de las variables que intervienen en las ecuaciones mecánicas, deterministas. Por el contrario, la descripción de los fenómenos subatómicos se fundamenta en ecuaciones probabilísticas, de índole mecánico-cuántica; en este caso, la aleatoriedad viene impuesta por la limitación inherente a la precisión con que pueden medirse determinadas variables.

¿Se asientan esas dos fuentes de aleatoriedad sobre una misma base? Si así no fuera, en la estructura de la física moderna los fenómenos microscópicos y macroscópicos se encontrarían separados por un hiato importante e incómodo. En efecto, los recientes cálculos de ordenador efectuados por un equipo de físicos italianos y soviéticos señalan que el dominio mecánico-cuántico carece del caos que tanto abunda en el universo macroscópico. En su trabajo se cuestiona hasta qué punto se compaginan la teoría mecánico-cuántica y la teoría del caos; habría que dudar incluso de la compatibilidad entre mecánica cuántica y cosmología, según algunos físicos.

Los sistemas "semiclásicos" constituyen un buen terreno donde someter a ensayo el encaje (o desencaje) de ambas teorías: las interacciones entre partículas y campos que pueden abordarse tanto desde la perspectiva clásica como desde un enfoque mecánico-cuántico. Giulio Casati, de la Universidad de Milán, Boris V. Chirikov y Dima L. Shepelyansky, del Instituto de Física Nuclear de Novosibirsk, e Italo Guarneri, de la Universidad de Pavía, han analizado uno de esos sistemas: la ionización de un átomo de hidrógeno altamente excitado por medio de microondas. Se acepta en general que los átomos de hidrógeno suelen ionizarse cada vez que su electrón absorbe un fotón cuya energía supera cierto valor umbral. Lo que llamó la atención de los autores fue la demostración experimental de que la ionización podía registrarse a frecuencias, o energías, muy inferiores al umbral de ionización por parte de un fotón único.

Según leemos en *Physical Review Letters*, el problema puede abordarse en el marco clásico por medio de un análisis que considere la ionización un proceso caótico; y, también, el problema puede expresarse en términos mecánico-cuánticos. Los investigadores aplicaron los dos enfoques teóricos y descubrieron que ambos ofrecían una probabilidad elevada de ionización a frecuencias inferiores al umbral del fotón único. Empero, en el tratamiento mecánico-cuántico la probabilidad de ionización se anulaba abruptamente a una frecuencia (por debajo del umbral de fotón único) a la que la probabilidad clásica seguía siendo era aún superior a cero.

El interés de esos resultados, informa en *Nature* Joseph Ford, del Instituto de Tecnología de Georgia, radica en tres aspectos. En primer lugar, constituyen una verificación teórica de que la ionización puede producirse por debajo del umbral del fotón único. De hecho, los cálculos de Casati y sus colegas muestran que, en condiciones adecuadas, resulta mucho más probable que se dé ese tipo de ionización que la de fotón único. Opina Ford que, si en verdad existe ese efecto, podría aplicarse para aumentar el rendimiento de los dispositivos electrónicos que en la actualidad utilizan el efecto de fotón único.

En segundo lugar, la gama de frecuencias en la que el electrón clásico puede ionizarse, pero el electrón cuántico no, ofrece la posibilidad de someter a ensayo la validez de ambos enfoques teóricos. Si las mediciones de laboratorio indican que se registra ionización en esa gama, entonces quizá deban revisarse las ecuaciones mecánico-cuánticas. Por último, el sistema añade otra paradoja al de por sí extraño mundo subatómico: un electrón puede considerarse caótico o no caótico en función de que el sistema se aborde desde una perspectiva clásica o mecánico-cuántica.

Coinciden con Ford otros científicos en que podrían evaluarse los dos primeros puntos sometiendo la predicción teórica a observación empírica; la paradoja, entienden, se resolvería sin más que aclarar la semántica. Norman H. Packard, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, señala que la definición clásica de caos se refiere a la evolución que sigue un sistema con el transcurso del tiempo; y añade que "resulta imposible reseguir la evolución temporal por mediciones mecánico-cuánticas". Si bien las ecuaciones que describen un sistema mecánico-cuántico en función del tiempo están bien definidas, no lo está el correspondiente estado físico del sistema; las ecuaciones definen el sistema considerándolo, en esencia, una superposición de todos los estados físicos posibles. Lo que se sondea al efectuar la medición de un sistema mecánico-cuántico es uno de los múltiples estados que el azar ha congelado en realidad.

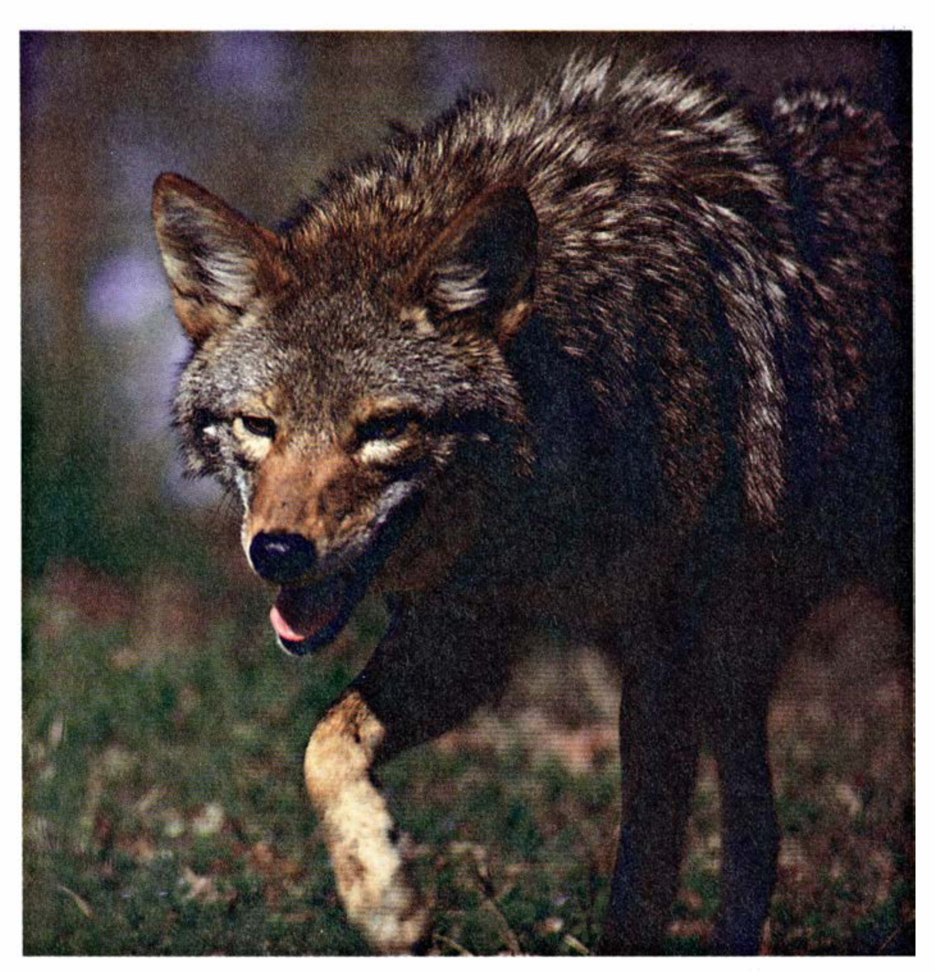
Ford sostiene que la paradoja resulta irreconciliable. Si las pruebas experimentales confirmasen su opción, prevé que habría que desechar la interpretación mecánico-cuántica en favor de una teoría universal del caos.

Animales políticos

El lobo rojo desapareció de los bosques de Norteamérica hace alrededor de una década, víctima de la destrucción de su hábitat y de su entrecruzamiento con el coyote. El Servicio de Protección de las Especies del Departamento del Interior de los Estados Unidos ha capturado unos cuantos ejemplares y los ha cruzado en cautiverio. Esta misma primavera, en lo que constituirá el primer caso de reintroducción en su hábitat natural de una especie que sólo perdura en cautividad, se liberarán tres parejas de lobos rojos en un refugio de Carolina del Norte.

Pese a esa mejora de las perspectivas del cánido, parece incierto el futuro que aguarda a la legislación federal sobre la provisión de fondos para su recuperación: el Decreto sobre Especies Amenazadas. Aprobado en 1973, ese estatuto protege las especies en peligro (animales o vegetales, norteamericanas o de otros lugares) frente a la caza, el comercio o cualquier otra actividad que pudieran atentar contra su integridad o su ecosistema. El decreto establece también que el citado Servicio, y en menor medida el Departamento de Comercio, arbitren las medidas que faciliten la recuperación de esas especies.

El plazo oficial de vigencia del decreto expiró en 1985. El Congreso norteamericano le ha concedido una prórroga temporal, pero sigue encontrándose en el limbo legislativo. Aun cuando la Cámara legislativa renovara el decreto este mismo año (tras el intento fallido de que lo hiciera el pasado), preocupa a algunos observadores que no se le conceda el imprescindible incremento presupuestario. Du-



2. LOBO ROJO, una de las más de 900 especies cuya protección legal contempla el Decreto estadounidense de Especies Amenazadas, sólo sobrevive ya en cautividad. Próximamente se devolverán seis ejemplares a su entorno natural.

rante más de una década, el presupuesto anual dedicado a programas de protección de especies amenazadas apenas ha variado: se destinan unos 25 millones de dólares al Servicio de Protección de las Especies y otros 5 millones de dólares al Servicio Nacional de Pesquerías del Departamento de Comercio. Según Michael J. Bean, de la Fundación para la Defensa del Medio Ambiente, la consiguiente erosión de la capacidad adquisitiva ha reducido el papel del decreto a frenar el declive de las especies amenazadas, en vez de impulsar su recuperación.

También se cuenta con algunos logros. En ciertas zonas se ha observado estos últimos años un incremento del número de ejemplares de algunas especies protegidas, así halcones peregrinos, caimanes, águilas, pelícanos y osos. Sin embargo, Bean señala que ninguno de esos animales ha logrado una recuperación suficiente para abandonar la lista de especies amenazadas. En todo el plazo de vigencia del decreto, sólo tres especies, todas ellas de aves de pequeñas islas del Pacífico, han alcanzado tal distinción.

Así, a primeros de año esa relación contenía aún 928 especies: 314 mamíferos, 223 aves, 142 vegetales, 100 reptiles, 81 peces, 25 bivalvos, 16 anfibios, 13 insectos, 9 gasterópodos y 5 crustáceos. J. Scott Feierabend ha escrito que el Servicio de Protección de las Especies ha desarrollado planes de recuperación para muchas, pero carece de los recursos necesarios para ponerlos en práctica. Feierabend opina que "la finalidad última del decreto es que abandonen la lista cuantos más vegetales y animales mejor".

Tampoco resulta fácil entrar en esa relación. David C. Klinger, del Servicio de Protección, afirma que hay unos 4000 aspirantes. Para que una especie, previamente nominada por científicos, grupos proteccionistas o el propio Servicio, reciba la consideración oficial de amenazada, el Servicio efectúa un examen que Klinger juzga "severísimo". Cuando una especie accede por fin a la relación quizá resulta ya demasiado tarde: parece que el sapo de Wyoming, incorporado a la lista en 1984, ya ha desaparecido; igual ocurre con algunas especies de pájaros.

Los proteccionistas aspiran igualmente a que mejore la conservación de las especies fuera de los Estados Unidos. El decreto prohíbe la importación de artículos obtenidos de especies amenazadas, por ejemplo, abrigos de pieles; más aún, autoriza al Departamento de Comercio a prestar ayuda a otras naciones en su esfuerzo por proteger ciertas especies. "La primera disposición, comenta Feierabend, está limitada por su propia naturaleza; la segunda está limitada por la carencia de fondos." Hace cuatro años la administración estadounidense redujo más aún la protección de especies no indígenas cuando su Departamento del Interior decretó que los organismos públicos norteamericanos —así el Departamento de Defensa o la Oficina de Desarrollo Internacional— no estaban obligados a consultar al Servicio de Protección los posibles impactos que sobre la vida local pudieran desencadenar los proyectos de construcción en que participen.

De hecho, el decreto no ha recibido excesivo apoyo por parte de la administración Reagan. Casi cada año, los presupuestos de la Casa Blanca proponen el recorte de la financiación del decreto; en el presupuesto para 1988 se recomendaba una reducción de casi el 20 por ciento en los programas del Servicio de Protección de las Especies. El Congreso suele restablecer los fondos, pero su apoyo no resulta en absoluto unánime. El año pasado, la Cámara de Representantes votó a favor de la renovación del decreto; si embargo, en el Senado algunos miembros insistieron en que debía introducirse en el decreto las enmiendas que permitieran el desarrollo de ciertas actividades en sus estados: en el de Texas, la construcción de una presa que supondría la desaparición de una especie local de serpiente y, en Alabama, la apertura de una mina a cielo abierto que amenazaría la tortuga almizclada. Al no lograr la introducción de esas enmiendas, los senadores bloquearon la prórroga. Cuando, esta primavera, el lobo rojo vuelva a dar sus primeros pasos en su entorno natural, en el Congreso se debatirá la prórroga del decreto.

La cría del retoño

¿Eran todos los dinosaurios ovíparos? Según Robert T. Bakker, de la Universidad de Colorado en Boulder, el brontosaurio, que, con sus 25 toneladas, se contaba entre los mayores dinosaurios, no llegaba al mundo en huevos del tamaño de un balón de

rugby, como muchos otros parientes suyos, sino que nacía vivíparo, del tamaño de un cerdo adulto. Bakker, quien ha propuesto que los dinosaurios fueron de sangre caliente, cree que las madres brontosaurio nutrían al robusto y solitario bebé de cada camada, en vez de abandonarlo a su suerte, como es costumbre entre los reptiles.

En apoyo de su hipótesis, Bakker señala que los mayores huevos de dinosaurio que se conoce rondan los 13 centímetros de diámetro; de superarse ese tamaño, las cáscaras resultarían demasiado gruesas para romperlas o para que el oxígeno del aire las atravesara y llegara al embrión. El índice de mortalidad de los dinosaurios era elevado cuando los diminutos ejemplares nacían de puestas numerosas y no recibían cuidados, como han señalado los paleontólogos en sus desenterramientos masivos de recién nacidos de varias especies; pero no se dispone de registro fósil de brontosaurios recién nacidos; los menores esqueletos identificados sin ambigüedad como perteneccientes a brontosaurios juveniles proceden de ejemplares que debieron pesar unos 120 kilogramos.

El canal de parto de las madres podría albergar fácilmente un feto de ese tamaño; según Bakker, la cavidad pelviana de las hembras fósiles era lo bastante ancha para que casi "pudiera atravesarla un Volkswagen 'escarabajo'". En opinión del autor, un período de gestación relativamente prolongado, seguido del nacimiento de una sola cría, en lugar de una numerosa camada, habría favorecido una "gran inversión parental". De ahí que, prosigue Bakker, resulte más probable que las madres tendieran a cuidar de la progenie y no a abandonarla. Las "sendas de huellas" descubiertas en Texas y Colorado, que muestran una mezcla de pisadas pequeñas y grandes, y la ausencia de pisadas de brontosaurios juveniles aisladas, se sumarían a las pruebas que apuntan la existencia de una estrecha relación entre prole y progenitores, sostiene Bakker.

Otros especialistas se muestran menos convencidos. Walter P. Coombs, del Western New England College, opina que el que los brontosaurios adultos y juveniles caminaran juntos no constituye necesariamente una señal de que la relación entre las madres y los hijos fuera estrecha. Según Coombs, la hipótesis del viviparismo formulada por Bakker precisa de pruebas más sólidas, por ejemplo, el hallazgo del fósil de un hembra que porte un feto de gran tamaño en su interior.

A lo cual responde Bakker que quizá ya se disponga de esa evidencia. En 1901 se recuperaron los restos de un dinosaurio de unos 60 kilogramos dispersos entre los huesos de un brontosaurio adulto. A la sazón, los paleontólogos juzgaron que el pequeño fósil pertenecía a un dinosurio de otra especie, un elosaurio, pero Bakker sostiene que quizá se tratara de un embrión portado por el adulto. Coincide Bakker (cuyas teorías se presentan en la reciente obra *The Dinosaur Heresies*) con Coombs en el sentido de que su hipótesis acerca del viviparismo no constituye más que un elemento de trabajo, pero confía en que tarde o temprano se descubran pruebas que la apoyen, pues no pasa año sin que se recupere algún fósil de brontosaurio.

¿Eran también vivíparas otras especies de dinosaurios de gran tamaño, como, por ejemplo, *Tyrannosaurus rex*? Bakker no lo cree probable. A diferencia de brontosaurio, *T. rex* presentaba un canal de parto muy estrecho; es más, esa especie muestra gran parentesco con las aves. "Sospecho, opina Bakker, que su modo de reproducción era aviar."

Conmutador lumínico

El análisis de la respuesta del semiconductor de arseniuro de galio frente a la luz ha descubierto un fenómeno que algún día quizás encuentre aplicación en un hipotético ordenador óptico. Ese aparato, en el que la información se transmitiría por medio de paquetes ópticos en vez de por corrientes eléctricas, resultaría más veloz que su equivalente electrónico; puede que también se adaptara mejor a las estrategias de procesamiento de la información en paralelo, que incrementarían aún más su capacidad. Sin embargo, para construir ese ordenador debe disponerse del equivalente óptico del transistor: un dispositivo en el que un haz de luz conmute la señal de otro. Numerosos grupos de investigación, de varios países, están abordando el problema desde diversos enfoques, y se han diseñado ya varios prototipos.

André Mysyrowicz, Danièle Hulin y sus colegas, de la École Polytechnique de París, han diseñado una nueva estrategia, cuya aplicación, sin embargo, se aventura lejana. Según informan en *Physical Review Letters*, un láser de pulsos ultrarrápidos produce conmutaciones, ultrarrápidas también, de la longitud de onda a la que el arseniuro de galio absorbe luz procedente de otro láser. Esas conmutaciones servirían de equivalente de los estados "activado" y "desactivado" del transistor.

Los materiales semiconductores absorben luz cuando los fotones provocan un salto de los electrones hacia niveles energéticos superiores. Al efectuar el salto, los electrones, que portan carga negativa, dejan tras de sí "huecos" de carga positiva en la red cristalina. Los huecos, a los que puede darse tratamiento de partículas, ejercen una atracción electrostática sobre los electrones. En efecto, ambos tienden a formar estados enlazados, denominados excitones, que resultan análogos a átomos de hidrógeno ordinarios. Cada excitón representa la absorción de un fotón.

Para crear excitones, los fotones del láser deben poseer energía suficiente para impulsar los electrones del semiconductor a través del "intervalo prohibido" que separa un nivel de energía cuantizada de otro. En la longitud de onda luminosa que corresponde precisamente a la energía del intervalo prohibido, la energía de enlace de un excitón (la longitud de onda de resonancia), la formación de excitones y, por consiguiente, la absorción de luz por parte del semiconductor, alcanzan un máximo abrupto. Las longitudes de onda de ambas laderas del pico atraviesan el semiconductor y se detectan.

En los experimentos de los que informan los científicos franceses se dirigió dos láseres contra un semiconductor híbrido formado por capas delgadas alternantes de arseniuro de galio y de arseniuro de galio y aluminio; la pulsación de ambos láseres se producía con un intervalo temporal inferior a la billonésima de segundo. El láser de "sonda" emitía un haz débil de amplio espectro, que comprendía la longitud de onda de resonancia del semiconductor: alrededor de 800 nanómetros, situada en la banda del infrarrojo cercano. El láser de "alimentación" (o de "bombeo") emitía un haz de gran intensidad y de longitud de onda ligeramente más larga, a la que los fotones no presentaban energía suficiente para crear excitones.

Mysyrowicz y sus colegas informan que al actuar sólo el láser de sonda, en el espectro de absorción del semiconductor se apreciaba el esperado máximo en la longitud de onda de resonancia. Sin embargo, durante las ráfagas del láser de alimentación se observaba un desplazamiento característico del máximo de absorción hacia una longitud de onda más corta y una amplitud inferior. A intensidades de alimentación elevadas, el pico casi se alisaba.

En explicación de sus hallazgos, los investigadores postulan la siguiente hipótesis. Los fotones procedentes del láser de alimentación, si bien incapaces de crear excitones por cuenta propia, se acoplarían a excitones generados por el láser de sonda. La energía requerida para crear esos excitones "de apaño" resulta superior a la necesaria para generar los normales, de tal modo que la absorción de la luz del láser de sonda por parte del semiconductor se desplaza hacia las longitudes de onda más cortas, de energías superiores. Puesto que se genera un número menor de excitones, también se aplana el pico de absorción.

La modificación del máximo de absorción la provocan los fotones de alimentación, por lo que no perdura mucho más que la ráfaga del láser de alimentación: alrededor de una billonésima de segundo. Tras lo cual la absorción de la luz de sonda por parte del semiconductor recobra la normalidad. En ello se fundamentan las perspectivas técnicas del fenómeno. En principio, el láser de alimentación que modificara las características de absorción de un semiconductor haría las funciones de equivalente de la base de un transistor: conmutaría la señal emitida por el láser de sonda a razón de un billón de veces por segundo (mucho más rápido que el más veloz de los transistores). Empero, son muchos los obstáculos que se oponen a la explotación práctica del efecto, por ejemplo, la enorme intensidad que precisa el láser de alimentación.

Sondeo del gelisol

La escasa fiabilidad de las fuentes que informan sobre las temperaturas registradas en el pasado ha venido frustrando la confirmación de la teoría del efecto invernadero, según la cual la acumulación de dióxido de carbono y otros residuos industriales está caldeando la atmósfera terrestre. Bajo la tundra helada del norte de Alaska, dos científicos del Servicio Geológico de los Estados Unidos han descubierto lo que podría ser una prueba de ese caldeamiento global.

El gelisol ("permafrost") constituye un medio excelente para el registro de las temperaturas superficiales. Cuanto más se profundiza, más se retrocede en el tiempo térmico. La ausencia de escorrentía facilita el cálculo del ritmo con que desciende el calor.

Arthur H. Lachenbruch y B. Vaughn Marshall han introducido termómetros en varias docenas de pozos de exploración petrolífera abandonados de Alaska. Encontraron que el gelisol circundante se había caldeado unos cuatro grados Celsius en los últimos 100 años. En una colaboración en *Science* sugieren que, pese a que el caldeamiento puede constituir un fenómeno de carácter estrictamente local, podría considerarse un primer aviso del efecto invernadero.

Los registros de las temperaturas superficiales acumulados en todo el mundo durante el siglo pasado, por incompletos que resulten, señalan, en efecto, un caldeamiento de alrededor de medio grado Celsius. Calentamiento global que se acentuaría en los polos, debido, según explica Lachenbruch, a diversos fenómenos de "retroalimentación positiva". Por ejemplo, cuando el sol funde la nieve, el terreno oscuro que la subyace absorbe más calor, lo que incrementa la fusión y el caldeamiento. Además, el movimiento convectivo del aire ártico es lento, lo que mantiene bastante cálido el aire atrapado cerca de la superficie.

Otros especialistas en geología ártica, si bien valoran positivamente el estudio sobre el gelisol, advierten que no demuestra de modo concluyente que el Artico se esté caldeando, y mucho menos el planeta entero. Thomas E. Osterkamp, del Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska, señala que los registros de temperatura obtenidos en el Artico son "muy restringidos". Esos datos, afirma Osterkamp, corroborarían los hallazgos de Lachenbruch y Marshall, a la vez que ayudarían a establecer de modo más preciso la relación existente entre las variaciones de temperatura de la superficie terrestre y los cambios registrados en el interior del suelo helado.

Osterkamp cree que la hipótesis del caldeamiento a largo plazo del gelisol está "fundamentada", pero agrega que en sus propias investigaciones ha obtenido pruebas de un reciente enfriamiento. En pozos abiertos expresamente para medir las temperaturas del suelo helado ha descubierto un enfriamiento de alrededor de un grado Celsius en los últimos tres años, en la costa de Alaska. Ese reciente descenso, opina, quizá responda a la reducción del grosor de la cubierta de nieve que aísla el suelo. Sin embargo, Osterkamp recalca que esos datos vienen a demostrar que "no todo avanza en el mismo sentido".

Gunther E. Weller, también del Instituto de Geofísica, sugiere que el efecto invernadero podría estar contrarrestándose con una tendencia al enfriamiento. Recuerda que la última edad de Hielo finalizó hace unos 12.000

años y afirma: "Vamos hacia climas más fríos".

Terapia por mímesis

Entre los factores que desencadenan la enfermedad coronaria cardiaca se cuenta un elevado nivel de colesterol en sangre. Desde hace 30 años se sabe que, estimulando la función hepática, las hormonas tiroideas reducen el colesterol circulante; los intentos de diseñar una administración terapéutica de agentes que mimeticen la actividad de la hormona tiroidea se han visto obstaculizados por su efecto colateral de acelerar el ritmo cardiaco. A. H. Underwood y sus colegas, de la compañía inglesa Smith Kline and French Research Limited, parecen haber encontrado una solución del problema. Han desarrollado un tiromimético que rebaja los niveles de colesterol sin incrementar el ritmo cardiaco. Según informan en *Nature*, partieron de la hormona natural T_3, de la que se conocen sus efectos sobre el corazón y el hígado. Seguidamente, el equipo midió en animales la incidencia, sobre las funciones cardiaca y hepática, de una serie de leves modificaciones de la estructura molecular de esa hormona. Uno de los tiromiméticos ensayados, SK&F L-94901, lograba una efectividad comparable con la producida por la T_3 en el estímulo de la función hepática y en la reducción del nivel de colesterol y, además, afectaba al corazón con una intensidad mil veces inferior.

La captación de las partículas de lipoproteínas de baja densidad (LDL), principales transportadores del colesterol en la sangre, se efectúa sobre todo en el hígado. Las hormonas tiroideas y sus mimetas aumentan la presentación de receptores de LDL en la superficie de las células hepáticas, con lo que se facilita el paso de las partículas de LDL a través de la pared celular; ya en el interior de la célula, el LDL se degrada. La cifra de receptores de LDL que albergue la superficie celular es función de la tasa con que la hormona tiroidea se una a sus propios receptores, dispuestos en los núcleos celulares. Por desgracia, los receptores cardiacos de las hormonas tiroideas son similares, si no idénticos, a los hepáticos. En otros términos, el incremento de la destrucción de LDL por medio de una terapia con hormonas tiroideas se acompaña de un aumento del gasto cardiaco, nada aconsejable en los pacientes de enfermedad coronaria.

En opinión de Underwood, el mecanismo por medio del cual el tiromimeta SK&F L-94901 separa el nivel de la respuesta cardiaca de la hepática interesa, ahora mismo, más que las posibles aplicaciones terapéuticas del agente en años venideros. En ensayos de interacción entre la hormona tiroidea y células cardiacas y hepáticas en cultivo, SK&F L-94901 no muestra un efecto selectivo del órgano. Sólo en estudios con animales se ha medido una notable diferencia en la tasa de unión del agente al corazón y al hígado.

Selectividad que sugiere que la afinidad por el receptor de la hormona tiroidea no constituye el factor limitante de la efectividad de la hormona, sino que los factores que controlan el paso de la hormona al interior celular, hasta su receptor, ejercen una influencia superior. Según Underwood, el estudio viene a apoyar trabajos anteriores en los que se describía una "bomba nuclear", o mecanismo de concentración, de la hormona tiroidea en el hígado. "Esa bomba nuclear, concluye el equipo de Smith Kline, podría explicar el acceso selectivo si, *in vivo,* la acción de bombeo de SK&F L-94901 hacia el núcleo fuera superior en el hígado que en el corazón."

Recombinación genética

Antes de reproducirse, los organismos suelen reorganizar su información genética. Los cromosomas intercambian fragmentos mediante un proceso de recombinación cuyos entresijos moleculares empiezan ahora a desentrañarse

Franklin W. Stahl

Para reproducirse con éxito, los seres vivos deben transmitir a la descendencia una copia fiel de su información genética. Curiosamente, la pauta fundamental de reproducción prevé que, antes de transmitirse, parte de esa información se baraje entre los recipientes que la albergan, los cromosomas: enormes moléculas de ADN bicatenario que contienen la información genética cifrada en una secuencia de subunidades químicas denominadas nucleótidos. Al proceso de mezcla, o reorganización, se le denomina recombinación genética.

Mucho antes de que, en 1953, James Watson y Francis H. C. Crick describieran la arquitectura molecular de la herencia, la doble hélice de ADN, se sabía ya que los genes, las unidades de información genética, no siempre "viajan" acompañados en su vecindad por las mismas secuencias. Así, por ejemplo, dos caracteres asociados a un mismo cromosoma en un individuo pueden aparecer en cromosomas distintos en sus descendientes. La frecuencia con la que dos genes cualesquiera de un cromosoma se transmiten juntos constituye una medida de su proximidad física: cuanto más cercanos estén, tanto mayor será la probabilidad de que se transmitan juntos.

Sin la base conceptual aportada por Watson y Crick carecía de sentido plantearse el mecanismo exacto por el que se lleva a cabo la reorganización de la información genética. Tres décadas después, las investigaciones realizadas con virus y bacterias, los organismos más sencillos, han revelado parte de los elegantes y complejos mecanismos que intervienen en el proceso de la recombinación.

Cabe esperar que en otros organismos, hombre incluido, actúen mecanismos análogos. La recombinación genética, como el ADN sobre el que actúa, es casi universal; en los organismos complejos suele producirse durante la meiosis, proceso de división celular del que resultan las células germinales (óvulos o espermatozoides).

En los precursores de las células germinales, como sucede en los restantes tejidos del organismo, los cromosomas se encuentran repartidos en dos juegos. Cada cromosoma posee un "homólogo", dotado de una información genética prácticamente idéntica. Uno de los juegos cromosómicos procede del óvulo materno y, el otro, del espermatozoide paterno. Durante la meiosis, los cromosomas homólogos se emparejan e intercambian porciones: se recombinan. La permuta no supone pérdida neta de información. Los juegos cromosómicos que se transmiten a las células germinales (que contienen la mitad de cromosomas que el resto de las células) son, por tanto, el resultado de una mezcolanza de los dos juegos progenitores.

¿Por qué recombinar?

Los cromosomas homólogos no son en absoluto idénticos, y ahí radica la importancia de la recombinación genética. Los cromosomas que se emparejan poseen, esencialmente, el mismo juego de genes, secuencias de nucleótidos que llevan, cifrada, la información para la síntesis de moléculas (en general proteínas) que determinan la forma y función del organismo. Sin embargo, las mutaciones acumuladas en el transcurso de la evolución de las especies pueden provocar que las dos copias de un gen difieran en uno o más nucleótidos, y que ello determine la aparición de rasgos distintos. Puede también que falte una de las copias, o parte de ella, o que aparezca interrumpida por la inserción de un fragmento de ADN extraño. Gracias a la recombinación, un cromosoma de célula germinal puede llevar cualquier combinación de las mutaciones presentes en los dos cromosomas parentales. De esa forma, se puede transmitir a la descendencia una gama ilimitada de combinaciones de caracteres.

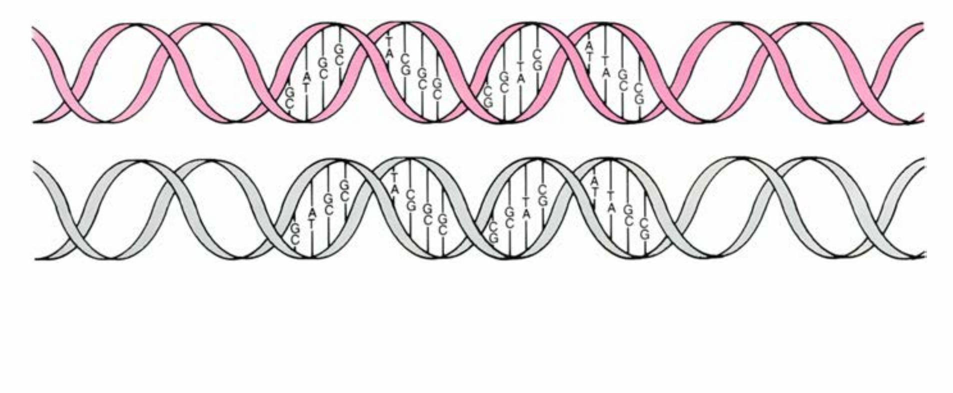
Sostiene el análisis darwinista que ésa es precisamente la razón de que, por evolución, se haya desarrollado la recombinación genética. Ante un cambio ambiental, la transmisión de una oferta amplia de combinaciones de caracteres conferirá al individuo ventaja selectiva, pues aumentará la probabilidad de que al menos uno de los descendientes reciba el juego de caracteres necesarios para sobrevivir y multiplicarse. Otros evolucionistas consideran, por el contrario, que, en la mayoría de las situaciones, la recombinación supone una desventaja selectiva. Entienden que, si el individuo ha logrado reproducirse con éxito, la combinación de caracteres aportada por los cromosomas parentales ha demostrado ya su eficacia. Si se supone que los cambios ambientales son lentos, el individuo obtiene más beneficio en "congelar" su legado genético que en barajarlo.

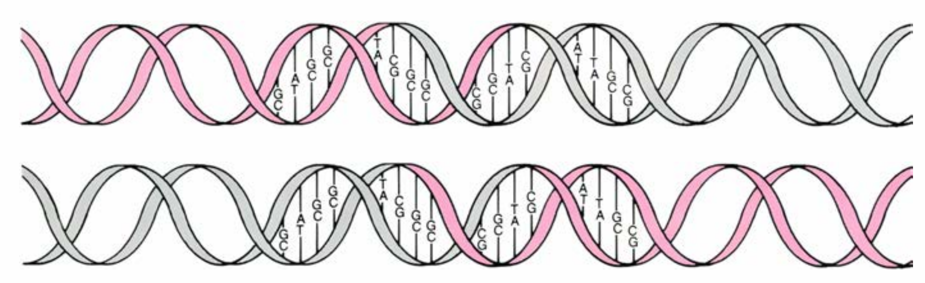
Para los que así argumentan, la recombinación genética ha persistido durante la evolución porque sirve a algún otro propósito. Por ejemplo, se dispone de pruebas en el sentido de que la recombinación genética constituye una de las manifestaciones de un mecanismo reparador que permite a las células reconstruir los cromosomas dañados y recuperar la información perdida a partir del cromosoma homólogo, intacto.

El modelo de ADN de Watson y Crick sugería de inmediato un mecanismo que explicaría la gran precisión con que se intercambia la información entre cromosomas recombinantes. El modelo refleja la disposición, en pares complementarios, de los nucleótidos de la molécula de ADN bicatenario; esa complementariedad determina que la



1. CROMOSOMAS ARLEQUINADOS, prueba del intercambio recíproco de material genético entre cromátidas hermanas (los dos filamentos idénticos que componen un cromosoma durante la división celular). Las imágenes se obtuvieron utilizando una técnica que altera químicamente las cromátidas, de tal suerte que presentan diferentes grados de fluorescencia al teñirlas con un colorante (*arriba*). La fotografía inferior muestra los múltiples intercambios producidos cuando se tratan los cromosomas con un agente que lesiona el ADN. Esos intercambios son análogos a los que se registran durante la recombinación genética, en cuanto que se conserva la totalidad de las cromátidas, es decir, no suponen ganancia ni pérdida de información genética. A diferencia de la recombinación, que, debido a las diferencias existentes entre los dos cromosomas que participan en el proceso, crea nuevas combinaciones de caracteres, el intercambio de cromátidas hermanas no suele tener consecuencias genéticas. (Fotografías de Sheldon Wolff, de la Universidad de California en San Francisco.)





2. RECOMBINACION entre dos cromosomas, entendida como el intercambio recíproco de material entre dos moléculas bicatenarias de ADN. La recombinación se produce en una región donde los dos cromosomas que interactúan comparten una secuencia de nucleótidos similar o idéntica (*arriba*). (Nucleótidos son las subunidades químicas que, debidamente combinadas, contienen, cifrada, la información genética dispuesta a lo largo de la doble hélice de ADN.) En cada molécula, las bases forman parejas complementarias. Las adeninas (*A*) de una hebra se emparejan siempre con las timinas (*T*) de la otra, y las guaninas (*G*) con las citosinas (*C*). Por esas reglas de complementaridad, un tramo de ADN monocatenario de uno de los cromosomas que participan en la recombinación encontrará siempre una secuencia complementaria en el otro cromosoma. Los cromosomas se alinean así de tal forma que el intercambio de fragmentos cromosómicos rinde cromosomas recombinantes completos (*abajo*). Aunque los cromosomas que participan en la permuta sean idénticos (o casi idénticos) donde se inicia el intercambio, pueden diferir en el contenido de su información genética en otros lugares, y así la permuta de material originará una nueva combinación de rasgos.

secuencia de bases de una de las cadenas fije la de la otra. Si, por ejemplo, durante el proceso de recombinación se genera un fragmento de ADN monocatenario en un cromosoma, éste puede reconocer su secuencia complementaria en otro cromosoma, gracias a las reglas de apareamiento de las bases.

¿Qué proceso expone primero esa cadena de ADN en forma monocatenaria y después la alinea con un cromosoma homólogo? ¿Cómo se cortan y empalman las cadenas de ADN de los cromosomas implicados para reconstruir uno o dos cromosomas recombinantes completos, cada uno de los cuales portara una nueva combinación de las mutaciones alojadas en los cromosomas que participaron en el proceso? Esas son las preguntas que han llevado, a otros investigadores y al autor, a la búsqueda de modelos moleculares más completos sobre la recombinación.

En 1965, cuando acometió el análisis genético de la recombinación en la conocida bacteria *Escherichia coli*, A. John Clark, de la Universidad de California en Berkeley, sentó las bases de los futuros modelos moleculares. Como ocurre con otras muchas bacterias, *E. coli* exhibe cierto comportamiento sexual. Entre parejas de bacterias se establece transitoriamente un puente, que permite al "macho" transferir su cromosoma a la "hembra". Seguidamente, los dos cromosomas bacterianos intercambian algunos fragmentos. El trabajo de Clark, y el de otros investigadores, permitió identificar una serie de genes, cuyos productos proteicos catalizaban ese proceso de recombinación.

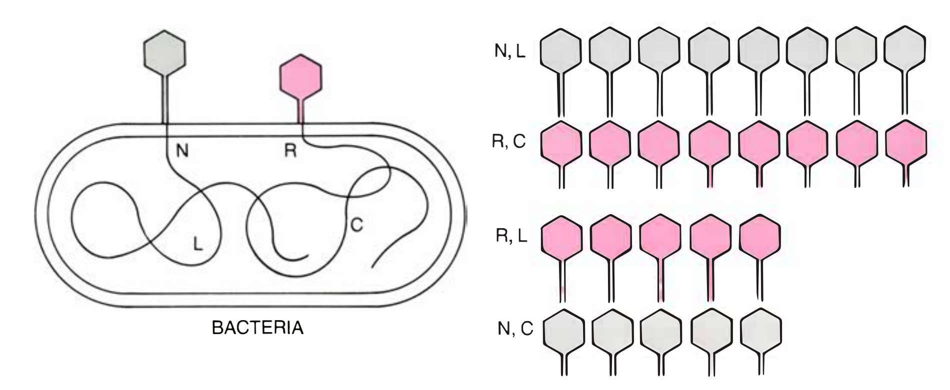
Organismos modelo

Se comprobaba la presencia de los genes por medio de mutaciones. Las estirpes de *E. coli* en las que el primero de los genes que debían identificarse, *recA*, había mutado, caracterizábanse por un nivel de recombinación mil veces inferior al normal. Las mutaciones que afectaban a los genes *recB* o *recC* reducían ese nivel unas cien veces.

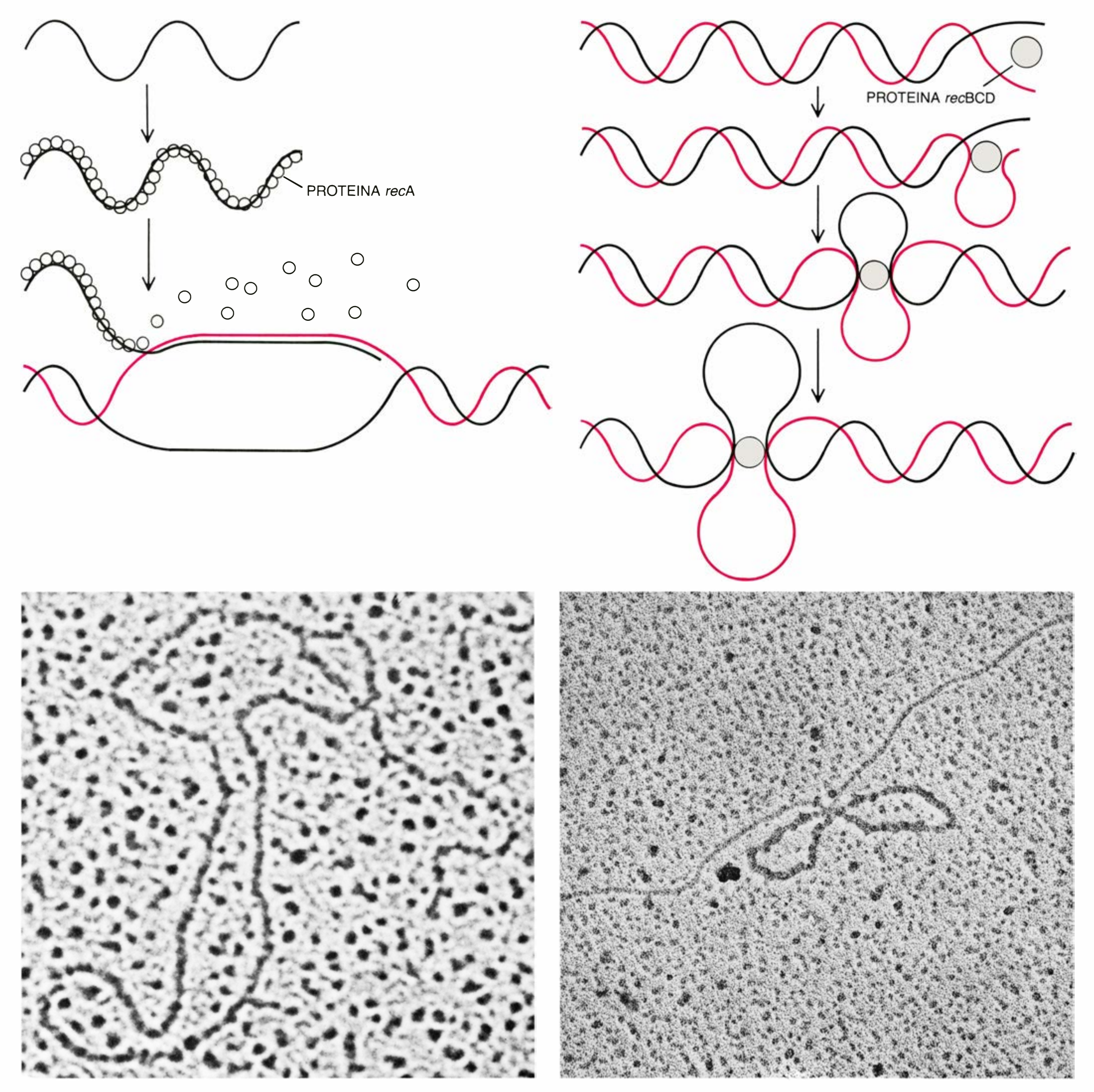
Se inició entonces la búsqueda de proteínas presentes en la estirpe silvestre (no mutada) de *E. coli* y que faltasen en las mutantes; se purificaron las proteínas *recA* y la *recBC*, esta última formada por subunidades determinadas por los genes *recB* y *recC*. Más tarde se comprobaría que *recBC* poseía un tercer componente, el producto del gen *recD*; de ahí su denominación actual: *recBCD*. Purificadas ya las proteínas, pudo investigarse su interacción con el ADN, en busca de indicios que ilustraran su papel en la recombinación genética.

In vitro, *recA* se une al ADN monocatenario, que puede obtenerse de ciertos virus pequeños. Ese ADN revestido de proteína interactúa con el ADN bicatenario intacto y provoca la separación de sus cadenas complementarias. La cadena revestida de proteínas recorre el ADN bicatenario hasta encontrar una secuencia homóloga de nucleótidos. Si lo consigue, forma un nuevo segmento bicatenario, o dúplex, con la cadena complementaria, desalojando a la que previamente ocupaba el puesto. Finalmente, la proteína *recA* abandona el lugar. Se forma así lo que se conoce por "bucle D", en el que la cadena de ADN desplazada configura un bucle alrededor del nuevo dúplex [*véase la figura 4*].

Al contrario que *recA*, la proteína *recBCD* sí presenta, *in vitro*, preferencia por el ADN bicatenario. En condiciones adecuadas, las electromicro-



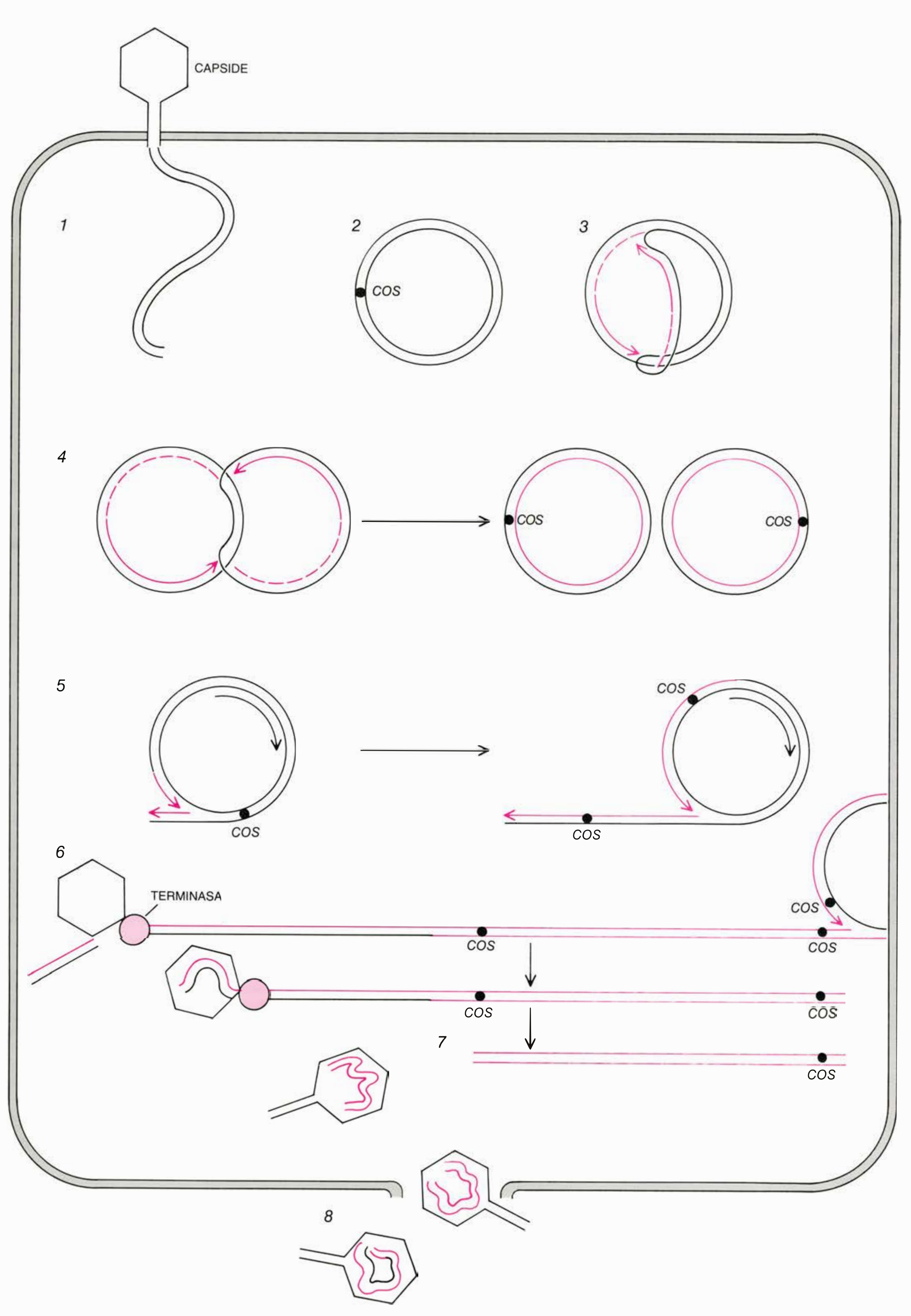
3. EFECTO DE LA RECOMBINACION, simulado con dos partículas de un bacteriófago (virus que infecta bacterias) y sus descendientes. Las partículas se adhieren a la bacteria e inyectan su cromosoma (*izquierda*). Los dos cromosomas portan variantes de hipotéticos genes que determinarían el color de la cubierta (*N* o *R*) y la longitud de la cola (*L* o *C*). En la célula hospedadora los cromosomas se replican y recombinan. *N* en la descendencia (*derecha*), la recombinación ha mezclado los genes en todas las combinaciones posibles.



4. LAS ENZIMAS DE RECOMBINACION de la bacteria *E. coli* manipulan el ADN de tal modo que favorecen ese intercambio. En ensayos efectuados *in vitro* la proteína *recA* recubre el ADN monocatenario (*arriba, a la izquierda*). De tal guisa, la cadena sencilla de ADN se introduce en una molécula de ADN bicatenario y la explora hasta que encuentra una secuencia complementaria de nucleótidos. Forma una nueva estructura bicatenaria (dúplex) con ella, desprendiéndose la proteína *recA*. El nuevo dúplex y la cadena desplazada forman un "bucle D". La electromicrografía muestra un bucle D inducido por la proteína *recA* (*abajo, a la izquierda*). *In vitro*, *recBCD*, otra de las proteínas de *E. coli* que participan en la recombinación, se sirve del extremo del cromosoma para introducirse en el ADN bicatenario y desplazarse entre las cadenas, separándolas a medida que avanza (*arriba, a la derecha*). La enzima va reasociando las cadenas a sus espaldas, pero las une con más lentitud que las separa, lo que determina la formación de bucles cada vez mayores de ADN monocatenario a ambos lados de la enzima. Se distinguen esos lazos en la micrografía tomada por Andrew Taylor, del laboratorio de Gerald R. Smith, del Centro Fred Hutchinson de Estudios del Cáncer (*abajo, a la derecha*). La capacidad de la enzima *recBCD* para generar tramos de ADN monocatenario, y la de *recA* para introducirlos en otras moléulas bicatenarias, apoyan la noción de que esas proteínas catalizan las primeras etapas de la recombinación del cromosoma bacteriano.

grafías nos revelan cómo la enzima se introduce por uno de los extremos del ADN bicatenario y va recorriéndolo entre las cadenas complementarias. A medida que avanza, la proteína va separando las cadenas, cerrándolas tras su paso. Empero, la reasociación de las cadenas es más lenta que su separación, por lo que van formándose, a ambos lados de la enzima, bucles de ADN monocatenario cada vez mayores [*véase la figura 4*]. En ciertas condiciones, la proteína *recBCD*, además de separar las cadenas de ADN, las corta.

Los estudios bioquímicos permitieron esbozar las circunstancias que rodean a las primeras etapas de la recombinación en *E. coli*. La proteína *recBCD* separa un fragmento de ADN monocatenario de uno de los cromosomas, fragmento que, con ayuda de la proteína *recA*, establece un nuevo dúplex con la secuencia complementaria que se encuentra en una de las hebras del otro cromosoma. En pasos ulteriores, de los que esas primeras observaciones *in vitro* no ofrecían ningún in-


CAPSIDE
1
2
COS
3
4
COS
COS
5
COS
COS
COS
6
TERMINASA
COS
COS
COS
COS
COS
7
COS
8

dicio, aquella estructura se resolvería en nuevos cromosomas, recombinantes. Las investigaciones realizadas por el autor y otros investigadores con el fago lambda, que ataca a *E. coli*, facilitaron la visión del proceso entero.

El fago lambda, como otros bacteriófagos, o virus que infectan a bacterias, posee un solo cromosoma, que se inyecta en la célula bacteriana para iniciar la infección. Una vez dentro, el ADN vírico se adueña de la maquinaria bioquímica de la bacteria. El virus se reproduce, es decir, fabrica nuevas moléculas de ADN y proteínas de la cápside. Los nuevos cromosomas se introducen en las cápsides recién formadas y el hospedador acaba arruinándose. Durante su breve estancia en la célula hospedadora, los cromosomas víricos se recombinan. Si dos estirpes de fagos genéticamente diferenciables infectan a un mismo hospedador, algunos de los descendientes portarán genes de ambas estirpes progenitoras.

Los fagos constituyen organismos especialmente atractivos para los estudios de recombinación; débese ello al tamaño mínimo de su único cromosoma, la sencillez física de las partículas infecciosas y la brevedad de su ciclo vital. Además, la elección de lambda como sujeto experimental ha permitido comprobar los efectos, en su cromosoma, de dos sistemas de recombinación, el de *E. coli* y el del propio virus, que acopla elementos propios con otros del sistema bacteriano.

También se han purificado las enzimas del sistema de recombinación de lambda, e igualmente se ha estudiado *in vitro* su actividad catalítica. Una de las proteínas, el producto del gen *red-alfa*, degrada una de las cadenas del ADN bicatenario, dejando al descubierto la otra hebra. Su función en el proceso de recombinación vírica semeja la supuesta en la proteína *recBCD*; es decir, consiste en aportar ADN monocatenario que vaya buscando su secuencia complementaria en el cromosoma homólogo. La proteína *recA* elaborada por la bacteria hospedadora recubriría al ADN monocatenario vírico e instaría la búsqueda. Otro producto génico del virus, la proteína *red-beta*, facilitaría el emparejamiento entre el ADN monocatenario y el otro cromosoma. Estudios *in vitro* indican que la proteína acelera el correcto apareamiento entre secuencias complementarias de ADN.

La vida de un fago

El comportamiento *in vitro* de las enzimas implicadas no basta para reconstruir con exactitud el proceso de recombinación entre cromosomas de lambda. Se impone recurrir a un sistema vivo. Las propias características del ciclo reproductor del fago han resultado de gran utilidad para desarrollar las estrategias experimentales que nos han permitido, a otros investigadores y a mi propio grupo, abordar ese problema.

Inyectado ya el cromosoma vírico (un segmento de ADN de alrededor de 48.500 nucleótidos) en *E. coli*, se unen los dos extremos de la molécula lineal. Los genes dispuestos sobre ese anillo de ADN dirigen la síntesis de las proteínas víricas, valiéndose para ello de la maquinaria bacteriana de síntesis. Parte de las proteínas son enzimas implicadas en la replicación del cromosoma de lambda, tarea que realizan en conjunción con enzimas de la propia bacteria. En primera instancia, la replicación del ADN sigue el denominado modelo theta, forma de replicación que rinde directamente cromosomas anulares. En este sistema, las enzimas replicadoras actúan sobre las dos cadenas del ADN parental en sentido contrario y generan dos moléculas anulares hijas. La representación que suele hacerse de ese sistema replicativo se asemeja a la letra griega theta (θ).

Tras varias rondas de replicación theta, algunos de los cromosomas adoptan un modo más eficaz, el denominado sigma, o replicación en "anillo rodante". Debe su nombre a que la cola que sobresale del anillo le confiere un aspecto semejante al de la sigma minúscula (σ). En la base de la cola trabajan continuamente un grupo de enzimas replicadoras que duplican las dos cadenas del ADN parental y forman una larga hilera de cromosomas víricos. La replicación sigma podría comenzar tras producirse una incisión en la forma replicativa theta, que daría pie al crecimiento de la cola. Las proteínas víricas determinadas por los genes *gam* y *red* intervienen en la transición hacia la replicación sigma. *Gam* inactiva la proteína *recBCD* del hospedador, ya que la actuación de ésta obstaculiza la replicación en anillo rodante. Se desconoce el papel que desempeñan las proteínas *red*.

Cuando da comienzo la replicación sigma, se han sintetizado ya las proteínas que forman las cápsides víricas y las enzimas encargadas de llenarlas de ADN. En el proceso de empaquetamiento, el papel principal lo desempeña la terminasa, enzima encargada de cortar las hileras de cromosomas producidas por replicación sigma. A lo largo de las hileras, y en las posiciones que corresponderían a la unión de los extremos de la molécula progenitora, anular, se repite una secuencia de nucleótidos denominada *cos*. La terminasa reconoce las secuencias *cos* y se une al ADN en la zona que queda a la derecha de esa secuencia, según suele representarse el cromosoma de lambda; seguidamente corta el ADN por la secuencia *cos*, que queda a su izquierda.

Sin soltarse del extremo que ahora queda libre, la terminasa se une a una cápside vacía, avanza por el ADN hacia su derecha y, al tiempo que arrastra la cápside consigo, la va llenando de ADN. Cuando el complejo terminasa-cápside topa con otra secuencia *cos*, que señala el fin de un cromosoma entero, la terminasa opera otro corte y se completa el empaquetamiento del ADN. Si ese segundo *cos* se hubiera escindido de antemano, el empaquetamiento se abortaría, aunque la mayor parte del cromosoma de lambda se encontrara ya en el interior de la cápside. Sólo se empaquetan los cromosomas que estén flanqueados por un par de secuencias *cos* enteras.

Los cromosomas anulares formados al unirse los extremos del ADN infeccioso, o producto de la replicación theta, contienen una sola secuencia *cos*. La terminasa puede, por tanto, cortarlos, pero no empaquetarlos. Ahora bien, por recombinación, esos cromosomas "solitarios" sí pueden optar todavía al empaquetamiento. Un ejemplo sencillo de recombinación entre cromosomas anulares ilustra esa opción. En los cromosomas lineales, la rotura y permuta de cadenas de ADN rinden dos recombinantes lineales, mientras que, ese mismo caso entre dos cromosomas anulares, origina una mo-

5. CICLO DE VIDA DEL FAGO LAMBDA. Constituye el marco de muchos de los estudios sobre recombinación. En primera instancia, la partícula vírica se adhiere a la membrana de su hospedador bacteriano e inyecta su cromosoma (*1*). Los extremos cromosómicos se funden en un anillo (*2*) y, en el punto de unión, se crea una secuencia *cos*. Seguidamente el ADN se replica, primero siguiendo un mecanismo poco eficaz, denominado replicación theta (por la configuración del conjunto durante el proceso), que crea nuevos cromosomas anulares (*3, 4*). Posteriormente, la replicación adopta la modalidad sigma (también denominada así por su parecido estructural con la letra griega) (*5*). La replicación sigma genera largas hileras de cromosomas víricos. La enzima terminasa empaqueta los cromosomas en las nuevas cápsides (sintetizadas con ayuda del hospedador); inicia el empaquetamiento de un cromosoma vírico tras cortar la hilera de cromosomas por una de las secuencias *cos* (*6*). Tras el corte, avanza a lo largo del cromosoma y va llenando una de las cápsides con el ADN hasta que encuentra otra secuencia *cos* y la corta (*7*). Cuando se ha ensamblado gran número de partículas víricas, el hospedador revienta y el virus se dispersa y provoca nuevas infecciones (*8*).

lécula, anular también, de doble tamaño. En esa molécula dimérica, los nuevos cromosomas recombinantes aparecen flanqueados por secuencias *cos*. Cualquiera de los cromosomas que forman el dímero (pero no ambos) puede entonces empaquetarse en una partícula vírica.

Un sistema experimental

Entre las partículas liberadas de una bacteria infectada, puede incrementarse la fracción de virus recombinantes si se impide la replicación de los cromosomas víricos. Así se facilita el análisis de los sistemas de recombinación del fago y del hospedador. Se trata de impedir que se produzca la replicación sigma, pues ésta genera largas hileras de cromosomas que se empaquetan directamente. Puesto que siguen desarrollándose todas las etapas del ciclo de vida del fago, salvo la replicación del ADN, los cromosomas anulares de los virus infectantes sólo se empaquetan en las nuevas partículas si previamente han sufrido recombinación.

Las mutaciones de sensibilidad a la temperatura que afectan a genes víricos y bacterianos implicados en la síntesis de las enzimas que copian ADN bloquean la replicación de los cromosomas víricos. Esas mutaciones no se manifiestan a temperatura ambiente, pues ello impediría la propagación de los virus y sus hospedadores bacterianos. Los experimentos se llevan a cabo a temperaturas más altas, donde se expresan las mutaciones y aparecen defectos en las enzimas replicadoras. La comprobación de que los cromosomas víricos no se replican en tales condiciones se realiza marcando el ADN de las partículas infecciosas y comparándolo con el de las partículas que se liberan de la célula hospedadora.

Para marcar el ADN de los fagos suele cultivarse el virus en un medio rico en isótopos pesados de nitrógeno y carbono, poco abundantes en circunstancias ordinarias. Las partículas víricas incorporan esos isótopos pesados en su ADN y resultan más densas que las de los virus cultivados en condiciones normales. Por centrifugación en gradiente de densidades, que separa las partículas víricas según su densidad respectiva, se detectan los isótopos pesados en las sucesivas generaciones víricas. Cuando se bloquea la replicación, las partículas obtenidas de las bacterias infectadas con fagos marcados poseen cromosomas formados casi totalmente por isótopos pesados, señal de que apenas sí se ha producido ADN nuevo.

Kenneth D. McMilin, de mi laboratorio, ideó un método que combinaba la técnica de los isótopos pesados con el sistema de bloqueo de la replicación para estudiar los sistemas de recombinación de los virus y sus bacterias hospedadoras. En el sistema experimental que puso a punto, las bacterias se infectaban con dos tipos de partículas lambda. Uno se había marcado con isótopos pesados y en el extremo izquierdo del cromosoma portaba un marcador genético, una mutación fácilmente identificable. El otro tipo llevaba isótopos ligeros, normales, y una mutación en el extremo derecho. Los descendientes de la infección mixta se separaron de acuerdo con su distinta densidad.

Entre la progenie (de la que la inmensa mayoría de los miembros tenían que haber sufrido recombinación), algunas partículas eran de densidad comparable a las progenitores, pesada o ligera. Los componentes de esos dos grupos eran, presumiblemente, fruto de recombinaciones entre dos moléculas marcadas y dos no marcadas, respectivamente. Las partículas cuya densidad se situaba entre esos dos extremos portaban, a buen seguro, cromosomas recombinantes, cuyo ADN sería en parte pesado y en parte ligero. Junto con la información ofrecida por la densidad, los marcadores genéticos presentes en los cromosomas permitían determinar dónde se había producido la recombinación.

El sistema Red

En el experimento inicial, el sistema de recombinación de la bacteria se había inactivado por una mutación que afectaba al gen *recA* de *E. coli*. Sólo el sistema vírico, denominado Red, podría llevar a cabo la recombinación necesaria para generar cromosomas susceptibles de empaquetamiento. La densidad de los descendientes recombinantes "silvestres" (sin ninguno de los marcadores genéticos), que debían

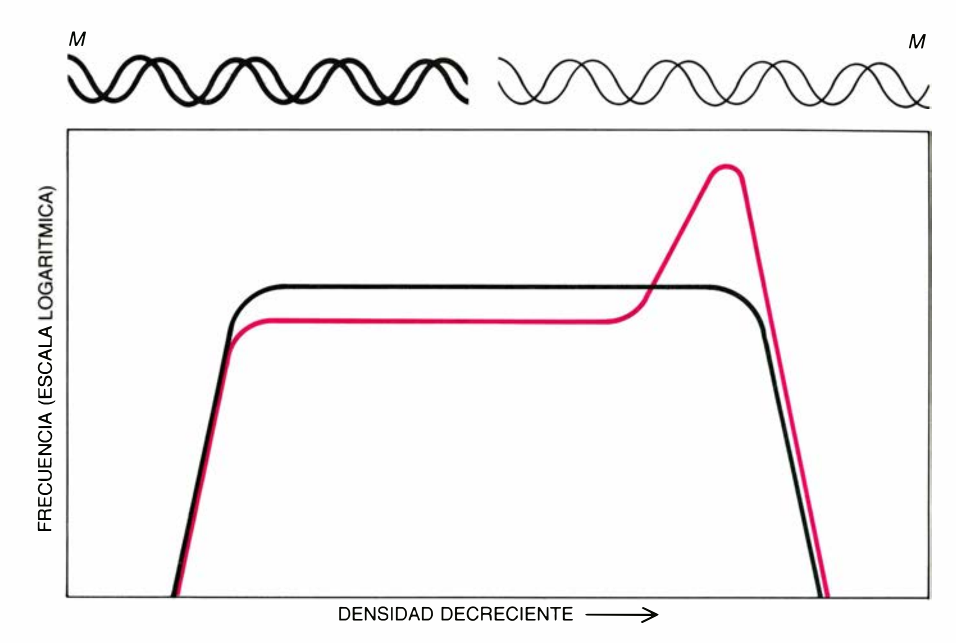
6. EMPAQUETAMIENTO DE UN CROMOSOMA ANULAR DE FAGO en la cápside, que sólo puede producirse tras recombinación de dos anillos. Los cromosomas anulares sólo poseen una secuencia *cos*. Por consiguiente, la enzima terminasa provocará un único corte cuando, para que se empaquete un cromosoma, deben escindirse dos secuencias *cos*, una al principio y otra al final del proceso. En el dibujo, los dos cromosomas que se recombinan son anulares (*1*) y el intercambio (*2*) crea una molécula, anular también, de doble tamaño (*3*). Esa nueva estructura contiene dos cromosomas completos, flanqueados por secuencias *cos*. La terminasa puede entonces encapsular uno cualquiera de los cromosomas (pero no ambos) (*4*).

portar la parte derecha de un cromosoma pesado y la izquierda de otro ligero, era baja. A todas luces, la descendencia silvestre contenía más ADN ligero que pesado, señal de que la recombinación había ocurrido preferentemente en la porción derecha del cromosoma del fago.

¿Qué caracterizaba a ese extremo del cromosoma para que la recombinación se concentrase en él? Los extremos del cromosoma de lambda quedan definidos por la presencia de *cos*, las secuencias de nucleótidos por donde la terminasa escinde los cromosomas anulares y las hileras producto de la replicación sigma. Utilizando técnicas de clonación de genes, Helios Murialdo, de la Universidad de Toronto, e Ichizo Kobayashi, en mi laboratorio, translocaron las secuencias *cos* del extremo al centro del cromosoma. En las bacterias infectadas por los fagos alterados, la terminasa debería cortar el ADN sólo por los nuevos sitios *cos*, con lo que, al empaquetarse los cromosomas, los antiguos extremos constituirían nuevas regiones centrales de los cromosomas. El análisis genético e isotópico de la descendencia de esa infección evidenció que la recombinación se concentraba en el nuevo extremo derecho del cromosoma vírico, es decir, en el nuevo sitio *cos*.

Se demostraba así que *cos* era lo que dio en llamarse un "recombinógeno", es decir, una secuencia que fomenta la recombinación genética en sus aledaños. La asimetría del estímulo recombinatorio (hacia el extremo derecho del cromosoma) alertaba sobre su mecanismo de acción. Según Kobayashi, en el sistema de recombinación catalizado por Red, *cos* desempeñaba el papel de iniciador del proceso, por ser el sitio donde la terminasa cortaba los cromosomas anulares. Al quedar la terminasa unida al extremo izquierdo del cromosoma, sólo el derecho tenía libertad de asociarse con otro cromosoma. El sistema Red actuaba sobre el extremo libre.

Según esa hipótesis, era de esperar que el sistema Red promoviese la recombinación en cualquier lugar del cromosoma de lambda susceptible de corte. Se sometió a prueba la validez de la predicción por medio de restrictasas, enzimas bacterianas que cortan el ADN en defensa contra virus invasores (y que se han convertido en una herramienta habitual en las manipulaciones genéticas de laboratorio). Cada restrictasa reconoce específicamente una breve secuencia de nucleótidos y corta por ella el ADN que la contenga, a menos que esa secuencia haya sido previamente modificada por otra enzima, que la bacteria elabora para proteger a su propio material genético.



7. DISTRIBUCION, POR DENSIDADES, de las partículas de fagos liberadas de bacterias infectadas en un experimento realizado para determinar los sitios de recombinación de los cromosomas víricos. Se inició cada infección con dos tipos distintos de partículas. El ADN de uno de los tipos llevaba isótopos que le conferían una densidad anormalmente alta, y además una mutación (*M*) en el extremo izquierdo del cromosoma (*arriba, a la izquierda*). El otro tipo de partículas contenía ADN de densidad normal y una mutación en el extremo derecho del cromosoma (*arriba, a la derecha*). Las infecciones se realizaron en condiciones que bloqueaban la replicación del ADN pero permitían el empaquetamiento de los cromosomas. Cuando se inactivaba el sistema de recombinación bacteriano, dejando activo sólo el sistema de recombinación del fago, las partículas de fago cuyos cromosomas no llevaban ninguna mutación tendían a ser del tipo "ligero" (*línea de color*). La ausencia de mutaciones indicaba que el ADN constaba de la parte derecha de un cromosoma denso y la izquierda de otro ligero. La baja densidad sugería que el fragmento de cromosoma denso debía ser pequeño. La recombinación debió concentrarse en el extremo derecho del cromosoma. Cuando el activo era el sistema de recombinación de la bacteria, las partículas de fagos sin mutaciones se distribuían en todas las densidades posibles (*línea negra*). La recombinación debió darse equitativamente por todo el cromosoma del virus.

David Thaler, de mi laboratorio, estudió la recombinación en bacterias que sintetizaban cierta restrictasa. Utilizó dos tipos de virus, uno de los cuales presentaba, sin modificar y en posición conocida, la secuencia reconocida por la restrictasa. El otro tipo de virus llevaba la misma secuencia, pero modificada, y por tanto irreconocible para la restrictasa. La modificación aseguraba la obtención de algunos cromosomas víricos completos, que podrían empaquetarse en las nuevas partículas víricas. Thaler bloqueó el sistema de recombinación bacteriano, dejando activo sólo el sistema Red. Al analizar los resultados, comprobó que la recombinación, intensa, se había concentrado en la región del cromosoma que portaba la secuencia reconocida por la restrictasa. No cabía duda de que los extremos del cromosoma cortado habían ido en busca de cromosomas modificados intactos y se habían recombinado con ellos.

El papel de la replicación

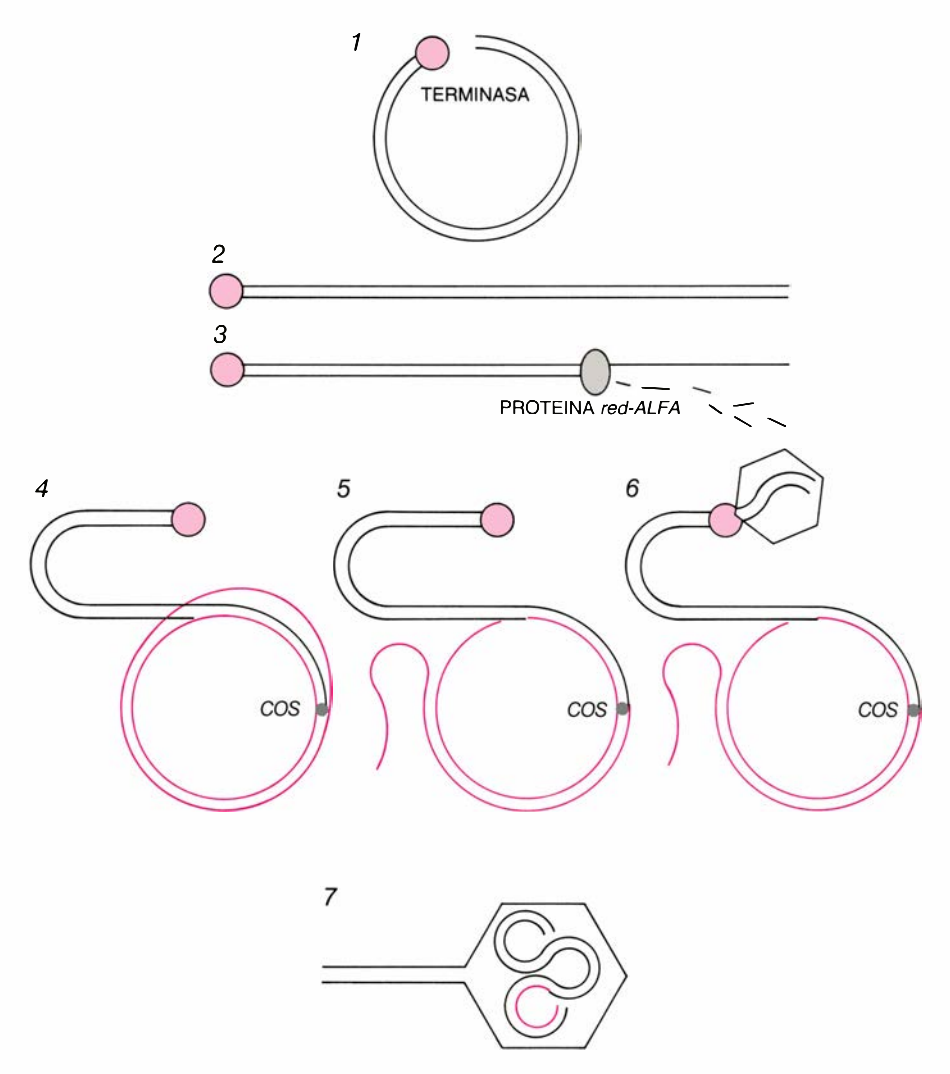
¿Cómo se comporta el sistema Red de recombinación del virus durante el ciclo reproductivo normal del fago lambda, cuando el ADN de éste se replica libremente? Resulta difícil responder a esa cuestión por el método del marcado de densidad, pues la desenfrenada replicación del ADN determinaría la síntesis de tal cantidad de ADN ligero nuevo que enmascararía los resultados. Sin embargo, cuando todas las partículas infectantes contienen isótopos pesados y sólo se permite una replicación limitada, los resultados son claros y concluyentes.

El autor y sus colegas infectaron células con dos tipos de partículas densas, que portaban marcadores genéticos diferenciables. Igual que en casos anteriores, los marcadores permitían determinar el sitio donde los cromosomas de la descendencia habían sufrido recombinación. Cuando éstos contenían sólo ADN denso (y por tanto no replicado), la recombinación se concentraba en el extremo derecho, como ocurría en el caso de los experimentos donde se bloqueaba la replicación. Si esos cromosomas eran parcial o totalmente ligeros (ADN de nueva síntesis), la recombinación se producía comprometiendo el cromosoma entero.

El sistema Red parecía actuar sobre extremos libres expuestos aleatoriamente durante la replicación, hipótesis

que encuentra apoyo en resultados obtenidos recientemente en estudios sobre recombinación mediada por el sistema Red en presencia de una proteína capaz de bloquear los extremos libres del ADN bicatenario. En ensayos donde se permite la libre replicación del virus, esa proteína inhibe la recombinación en todo el cromosoma. El comienzo de la replicación sigma constituye probablemente la fuente de los extremos libres que, según esos resultados, se distribuirían aleatoriamente por el cromosoma. La incisión que inicia la replicación sigma parece darse en cualquier lugar del anillo cromosómico, y así la cola que crece a partir de él puede iniciarse en cualquier punto de la secuencia de ADN.

La asociación entre la recombinación mediada por el sistema Red y los extremos cromosómicos, sumada al comportamiento *in vitro* de las enzimas implicadas en dicho sistema de recombinación, ofrecen una visión clara de las etapas iniciales del proceso [*véase la figura 8*]. El producto del gen *red-alfa* digiere parcialmente, a partir del extremo libre, una de las cadenas de algún cromosoma. La degradación deja al descubierto un fragmento de ADN monocatenario, que forma un complejo con otro cromosoma anular y genera un bucle D donde encuentra su secuencia homóloga. La proteína *red-alfa* del fago y la *recA* de la bacteria podrían facilitar el proceso, cuya conclusión, con la postrer formación de un cromosoma recombinante, requiere otras etapas catalizadas enzimáticamente, de las que no se han recabado todavía suficientes datos.



8. SISTEMA DE RECOMBINACION DEL FAGO LAMBDA, que parece actuar sobre uno de los extremos libres del ADN bicatenario. La enzima terminasa genera el extremo libre tras cortar el cromosoma anular del fago por la secuencia *cos* (*1*). La enzima permanece unida al extremo izquierdo (*2*). El producto del gen *red-alfa* del fago digiere parcialmente una de las cadenas del cromosoma, empezando por el extremo derecho (*3*). El fragmento de ADN monocatenario que se genera invade otro cromosoma, creando un nuevo dúplex y formando un bucle D (*4*). Otras enzimas cortan y empalman cadenas en el bucle D de tal modo que el cromosoma que inició el proceso y el nuevo dúplex se enlazan sin solución de continuidad (*5*). La terminasa se desplaza entonces por el ADN, empaquetándolo en una cápside vacía (*6*). Esa misma enzima corta el ADN invadido por la secuencia *cos*, lo que rinde una nueva partícula con un cromosoma recombinante (*7*). El modelo se ajusta a las observaciones sobre el comportamiento de la proteína *red-alfa* y al descubrimiento de que la recombinación genética catalizada por el sistema del fago se concentra cerca de los extremos.

El sistema Rec

El autor y sus colegas utilizaron la misma estrategia para determinar el sitio de recombinación del sistema Rec de *E. coli*. Se infectaron bacterias portadoras de un sistema de recombinación intacto con fagos marcados y no marcados, que, además, llevaban mutaciones en los genes *red* y *gam*; tales mutaciones anulan el sistema de recombinación del virus y le impiden bloquear el del hospedador. El efecto ejercido sobre el cromosoma del fago difería sorprendentemente de lo observado cuando el sistema Red se encontraba activo; en los ensayos de bloqueo de la replicación, la recombinación se daba con una frecuencia casi similar a lo largo de todo el cromosoma. No había preferencias por los alrededores de las secuencias *cos*, pauta que no variaba cuando se permitía cierta replicación. Por consiguiente, el sistema Rec, a diferencia del Red, no parecía mostrar preferencia especial por los extremos del cromosoma.

Las investigaciones de David Henderson, de la Universidad de Edimburgo, que trabajaba con mutantes de lambda carentes de los genes *red* y *gam*, ofrecieron más detalles sobre el sistema Rec. Los mutantes de Henderson sólo presentaban replicación theta, pues los genes alterados resultaban esenciales para la recombinación y la replicación sigma. Como otros autores, observó también que esos virus no podían desarrollarse en bacterias cuyos genes *recA* hubieran mutado: si faltaban el sistema de recombinación del fago y el de la bacteria, ni los cromosomas originales ni los anulares fruto de la replicación theta podían empaquetarse en las nuevas partículas.

Para su sorpresa, Henderson comprobó que el virus mutante tampoco crecía bien sobre bacterias con el sistema Rec intacto. El sistema Rec funcional debería producir cromosomas anulares empaquetables, por recombinación entre ellos; sin embargo, sólo se producían unas pocas partículas de fago maduras. El sistema Rec parecía actuar con escasa eficacia sobre el cromosoma vírico.

En los cultivos de fagos de Henderson apareció espontáneamente un segundo mutante, que no tardó en superar al mutante original, de crecimiento lento. La prosperidad del nuevo fago no respondía a que se sirviera de algún truco para sacar ventaja

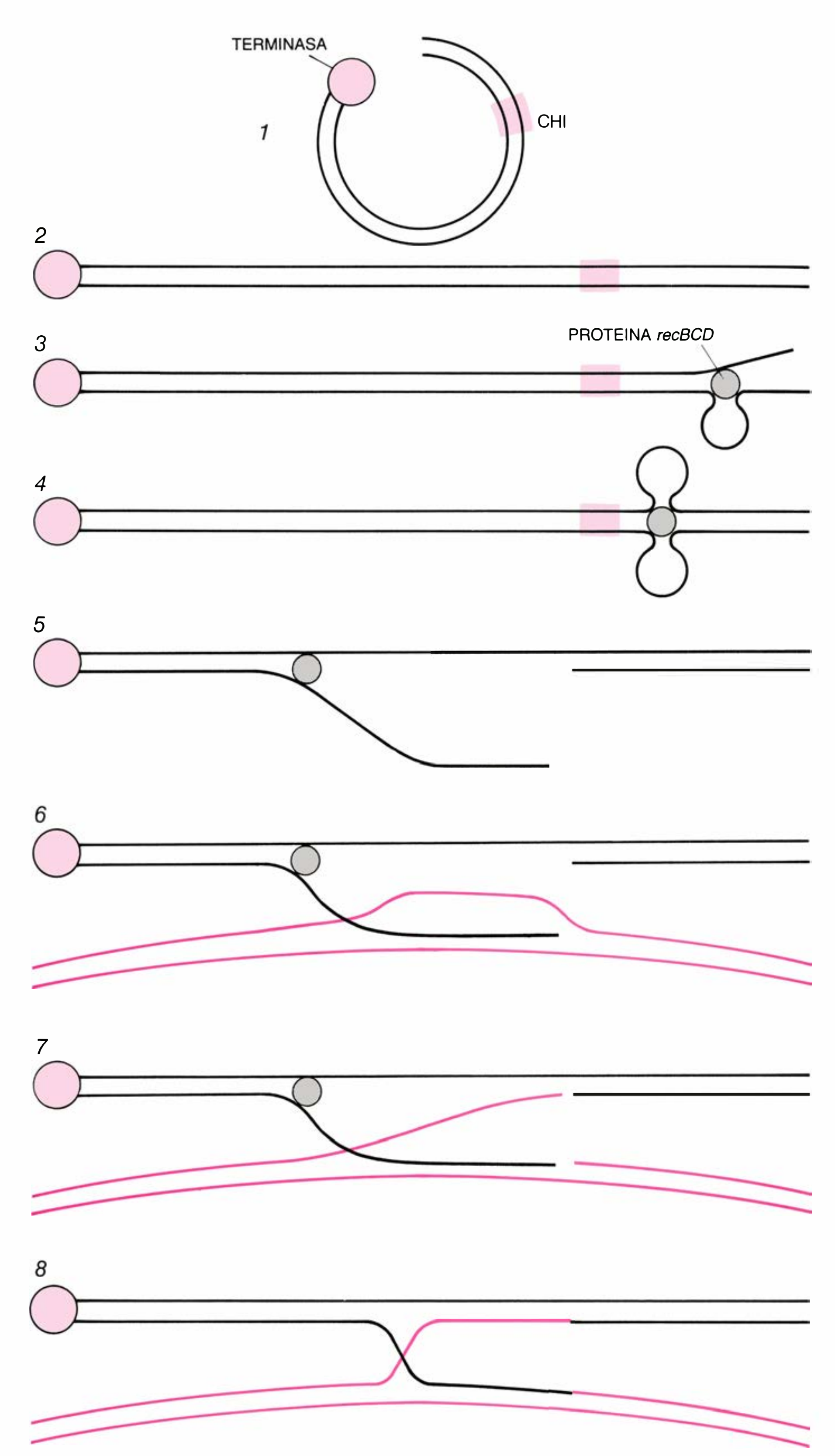
en el empaquetamiento; antes bien, ocurría que el sistema Rec actuaba mejor sobre su ADN. La mutación que provocaba ese efecto había creado una secuencia de ocho nucleótidos; se la bautizó Chi.

Valiéndonos de los métodos de McMilin, determinamos la distribución de los sitios de recombinación de estirpes portadoras de secuencias Chi. Encontramos que todos los mutantes ofrecían una elevadísima frecuencia de recombinación en las cercanías de Chi. La mutación del cromosoma de lambda había propiciado la aparición de una secuencia que actuaba de recombinógeno del sistema Rec de la bacteria hospedadora, igual que hacía *cos* en el sistema Red.

Intervención de Chi

Puede que pronto sepamos cuál es el mecanismo de actuación de Chi. Cualquier modelo que pretenda explicar la función de Chi deberá tener en cuenta las múltiples características de esas secuencias que se han descrito desde su descubrimiento. Se sabe, por ejemplo, que a Chi le corresponde un papel fundamental en la recombinación mediada por el sistema Rec del propio cromosoma de *E. coli*, que está plagado de secuencias Chi. No tiene efecto, sin embargo, sobre otros sistemas, como el Red de lambda. Cabe suponer, por tanto, que interactúa directamente con alguna de las enzimas implicadas en el sistema Rec.

Según parece, Chi deja sentir su acción a cierta distancia. Para estimular la recombinación, basta con que Chi se encuentre en uno de los dos cromosomas que participan en el proceso. En el otro cromosoma, aun cuando falten el sitio correspondiente a Chi y miles de nucleótidos a cada lado, se registra recombinación estimulada por Chi a partir de donde se reanude la homología entre los dos cromosomas. Resulta significativo que esa acción a distancia se observase al principio sólo a un lado de Chi, a la izquierda de la secuencia en la representación habitual de lambda. La acción de Chi, además de ser direccional, depende de la orientación de la secuencia en el cromosoma del fago lambda. Cuando, mediante técnicas de ingeniería genética, se invierte la secuencia de Chi, cesa su funcionamiento. Curiosamente, si en el cromosoma de lambda que lleva una secuencia Chi invertida, y por tanto "silenciosa", se introduce una secuencia *cos* invertida, la secuencia Chi recupera su actividad. La característica más re-



9. SISTEMA DE RECOMBINACION DE *E. COLI*, que parece depender de la interacción entre la proteína *recBCD* bacteriana y una secuencia de ADN denominada Chi. En la ilustración se muestra un modelo de la interacción que podría darse en el cromosoma del fago lambda, que infecta *E. coli*. Cuando la terminasa ha abierto el cromosoma anular (*1*), formándose un cromosoma lineal (*2*), la enzima *recBCD* se introduce en el ADN bicatenario y avanza a lo largo de la molécula (*3*), creando bucles de ADN monocatenario hasta que encuentra una secuencia Chi (*4*). El encuentro provoca un cambio en la especificidad de la enzima, que corta entonces uno de los bucles (*5*). Con ayuda de la proteína *recA* (no mostrada), la cadena libre invade otro cromosoma vírico y forma un bucle D (*6*). Posteriormente, otras enzimas escinden la cadena desplazada del bucle D, quedando ésta libre para emparejarse con el cromosoma que inició el proceso (*7*). Las cadenas que acaban de yuxtaponerse sellan sus extremos (*8*) y aparece un intermediario denominado de Holliday: una estructura cruciforme que posteriormente puede resolverse en dos cromosomas recombinantes. Descubrimientos recientes, no obstante, han descalificado el modelo de Holliday. (Dibujos de Andrew Christie.)

levante de *cos* resultó ser su papel como señalizador del sitio por donde la terminasa corta el ADN bicatenario. Cuando un fago portador de una secuencia Chi invertida infecta una bacteria que produce una restrictasa capaz de cortar el cromosoma de lambda, la secuencia Chi recobra su función. Tras activarse por la presencia de una doble cadena cortada, la secuencia Chi invertida estimula la recombinación hacia su derecha.

Se concilian esas observaciones en la hipótesis de que Chi interactúe con algún tipo de maquinaria de recombinación móvil. Formada por una o varias enzimas, esa maquinaria se uniría a uno de los extremos libres del cromosoma y avanzaría por el ADN en un sentido, hasta topar con una secuencia Chi dispuesta en la orientación correcta. La orientación que se toma por correcta es la que se encuentra activa cuando la maquinaria de recombinación empieza a desplazarse a partir del extremo derecho del cromosoma, el que suele quedar libre cuando la terminasa corta una secuencia *cos*. Las secuencias Chi invertidas resultan funcionales si la maquinaria de recombinación avanza en sentido contrario, es decir, desde el lado izquierdo del cromosoma hacia el derecho. La terminasa sólo genera extremos izquierdos libres si la secuencia *cos*, que señala el punto por donde la enzima corta el anillo cromosómico, se encuentra también invertida.

Crece la probabilidad de que actúe la maquinaria de recombinación cuando, en su avance, encuentra una secuencia Chi dispuesta en la orientación adecuada. De acuerdo con la observación de que Chi puede actuar a distancia, la recombinación quizá se registre una vez que la maquinaria ha superado a Chi: a la izquierda de Chi, si la orientación de la secuencia es la convencional; a su derecha, si está invertida.

El intermediario de Holliday

La maquinaria móvil de recombinación del sistema Rec no es mera hipótesis: se han identificado algunos de sus componentes. Sus propiedades recuerdan el comportamiento *in vitro* de la enzima *recBCD*, que también se une a uno de los extremos libres del ADN bicatenario, se desplaza por éste y genera fragmentos de ADN monocatenario. Es más, se han identificado ciertas mutaciones de *recBCD* que mantienen al sistema Rec activo, pero lo dejan insensible a las secuencias Chi, lo que apunta hacia una interacción directa entre Chi y la proteína *recBCD*.

¿Qué papel desempeña la proteína en la recombinación y cómo la estimula Chi? En concreto, ¿qué tipo de estructura se genera cuando la recombinación ocurre lejos de uno de los extremos de la doble cadena, como es el caso de la recombinación que depende del sistema Rec? En 1964, Robin Holliday, a la sazón en el Instituto John Innes de Hertford, Inglaterra, propuso que, en el transcurso de la recombinación, el proceso de intercambio de ADN afectaría sólo a una cadena de cada cromosoma, se cortaría, se unirían sus extremos con la continuación en el otro cromosoma y se formaría una "estructura de cadenas en cruz", o intermediario de Holliday.

La resolución del intermediario en cromosomas separados precisa de otro paso de corte y empalme de las cadenas. Por la propia geometría de la estructura [*véase la figura 10*], el corte y reunión puede tener lugar en las cadenas que se han intercambiado o en las complementarias. En el primer caso, la resolución de la estructura origina "parches" recombinantes, es decir, cromosomas en los que el intercambio de ADN ha afectado sólo a un pequeño fragmento monocatenario. En el segundo caso, se intercambian también las cadenas complementarias, con lo que la recombinación implica a segmentos completos de cromosomas (recombinantes "entrecruzados").

La cuestión a dilucidar era si la proteína *recBCD*, activada por Chi, catalizaba la formación de la estructura de Holliday o su resolución. Observaciones realizadas *in vitro* por Gerald R. Smith y sus colegas, del Centro Fred Hutchinson de Estudios sobre el Cán-

10. RESOLUCION DE UNA ESTRUCTURA CRUCIFORME, que puede llevar a resultados muy diferentes, según el modelo propuesto por Robin Holliday en 1964. La estructura, formada en algunos procesos de recombinación (*véase la figura 9*), puede representarse también en una configuración que recuerda un cruce de caminos, en el cual los cuatro fragmentos de ADN bicatenario confluyen en ángulo recto. Si se produce un corte en el punto de intersección y se unen los extremos de las dos hebras monocatenarias situadas a cada lado del sitio de corte, se obtienen recombinantes con "parches", cromosomas en los que el intercambio de cadenas ha afectado a un pequeño tramo de ADN monocatenario (*izquierda*). Una opción alternativa de corte y empalme rinde recombinantes por entrecruzamiento: cromosomas totalmente recombinantes (*derecha*).

cer, apoyaban un modelo que se decantaba por la primera opción. El grupo de Seattle comprobó que, en ciertas condiciones, la proteína, tras desplazarse a lo largo de una molécula de ADN, respondía a una secuencia Chi dispuesta en la orientación correcta cortando una de las cadenas; concretamente, la que se transcribe durante la síntesis de las proteínas víricas, esto es, la que se lee de derecha a izquierda.

En el modelo, el corte interrumpe la reasociación del ADN que sigue al paso de la enzima. La cadena cortada, ahora con un extremo libre, se deshace de la estructura bicatenaria, se recubre con proteína *recA* e invade el cromosoma homólogo originando un bucle D. La cadena desplazada en la formación del bucle se asocia con el primer cromosoma y, tras un proceso de corte y empalme de cadenas, se forma la estructura intermedia de Holliday [*véase la figura 9*]. La resolución de esa estructura puede crear recombinantes "parcheados" o "entrecruzados". El modelo, propuesto para explicar el papel de Chi y de *recBCD*, resulta tan atractivo que se da por cierto en la última edición de un conocido libro de texto. Descubrimientos recientes, sin embargo, lo ponen en duda.

Susan Rosenberg sometió a prueba, en mi laboratorio, una de las predicciones del modelo. Según éste, la cadena cortada *in vitro* por la proteína *recBCD*, la que se lee de derecha a izquierda, era también la que se cortaba *in vivo* e iniciaba la recombinación. Cuando una cadena que se lee de derecha a izquierda invade un cromosoma homólogo y se empareja con su secuencia de ADN complementaria, debe desplazar la cadena que se lee también de derecha a izquierda. Por consiguiente, las cadenas que se entrecruzan en la estructura de Holliday deben leerse de derecha a izquierda y, si se forman recombinantes con parches, el modelo exige que éstos aparezcan en esas mismas cadenas.

Rosenberg encontró precisamente lo contrario. Los parches se manifestaban en las cadenas que se leen de izquierda a derecha, es decir, las que, *in vitro*, no se cortaban. El hallazgo descarta el modelo sencillo, basado en observaciones *in vitro*. Otra versión del modelo postula igualmente que la recombinación se inicia en una cadena que se lee de derecha a izquierda y que después, fruto de un complejo mecanismo, los parches acaban en la cadena contraria. Una de las predicciones de ese segundo modelo tampoco se cumple, según demostró también Rosenberg.

El fracaso de ambos modelos sugiere

que el corte de la cadena estimulado *in vitro* por Chi, aun cuando se diera también *in vivo*, quizá no sirva para iniciar la recombinación. Por consiguiente, vuelve a plantearse la cuestión de si Chi estimula la formación o la resolución de la estructura de Holliday. Ello ha intensificado las investigaciones empeñadas en hallar la respuesta y en esclarecer el tipo de interacciones que se registran entre Chi y la proteína *recBCD*.

Estilos de recombinación

A falta de algunos detalles que quedan por resolver, resulta evidente que la recombinación sigue, en *E. coli* y el fago lambda, rutas moleculares muy distintas. En el sistema Red del virus, el extremo libre de la molécula bicatenaria es el sitio activo, y es ahí donde actúan las enzimas correspondientes para promover la recombinación. El sistema se adapta al modo de vida de lambda, pues el extremo libre se crea aleatoriamente entre la secuencia cromosómica durante la replicación sigma. En la bacteria, los extremos cromosómicos ocupan posiciones fijas y, para que la recombinación afecte a un punto cualquiera del cromosoma, se precisa un sistema distinto. En el Rec de la bacteria, el extremo libre del cromosoma se utiliza como sitio de entrada de la maquinaria que efectúa la recombinación, que se registra a cierta distancia, arbitraria, del extremo.

El mecanismo utilizado en la recombinación depende, por tanto, de la idiosincrasia genética de cada organismo. Incluso un mismo organismo puede servirse de mecanismos distintos. *E. coli*, por ejemplo, posee un sistema auxiliar conocido por RecF, y ciertos hongos parecen contar también con varios mecanismos para llevar a cabo la recombinación de su material genético. El estudio de la recombinación en organismos más complejos quizá revele nuevas variantes.

La importancia de esos estudios radica, además, en la posibilidad de que algún día lleguen a explotarse los mecanismos naturales de recombinación para remplazar genes de organismos pluricelulares, lo que ofrecería indudables beneficios para la agricultura y el tratamiento de enfermedades genéticas humanas. La inserción de un gen modificado en el lugar exacto que le corresponde queda muy lejos de las posibilidades actuales de la ingeniería genética. Los mecanismos que utilizan los organismos para recombinar su dotación genética, muy precisos y complejos, bien podrían ser las herramientas de la biotecnología del futuro.

Electrones balísticos en semiconductores

Los dispositivos en los que los electrones transportan corriente sin dispersarse prometen ser mucho más rápidos que los componentes utilizados en la actualidad. Permitirán estudiar las propiedades cuánticas de los electrones

Mordehai Heiblum y Lester F. Eastman

En el tubo de imagen de un televisor, los electrones se mueven balísticamente entre el cátodo y la pantalla; su movimiento tiene lugar a lo largo de trayectorias suaves que no se ven perturbadas por interacciones o colisiones con otras partículas. Dado que en el tubo del televisor existen muy pocas moléculas gaseosas, dichas moléculas no dispersan muchos electrones. Por el contrario, en los dispositivos semiconductores, tales como los transistores, el movimiento de los electrones portadores de la corriente resulta permanentemente perturbado a causa de las dispersiones. Todos los electrones se dispersan muy frecuentemente y en todas direcciones; de ahí que su movimiento recuerde el aleatorio de una molécula en el seno de un gas o un líquido ordinarios. En su movimiento al azar, el electrón medio recorre una distancia mucho mayor que su alcance neto. En consecuencia, el flujo neto de electrones en la dirección del campo eléctrico es mucho más lento que la velocidad real de los electrones. Si se consiguiera que los electrones se movieran en el seno de los semiconductores sin dispersarse —es decir, balísticamente—, la velocidad de los transistores aumentaría, en principio, de forma espectacular.

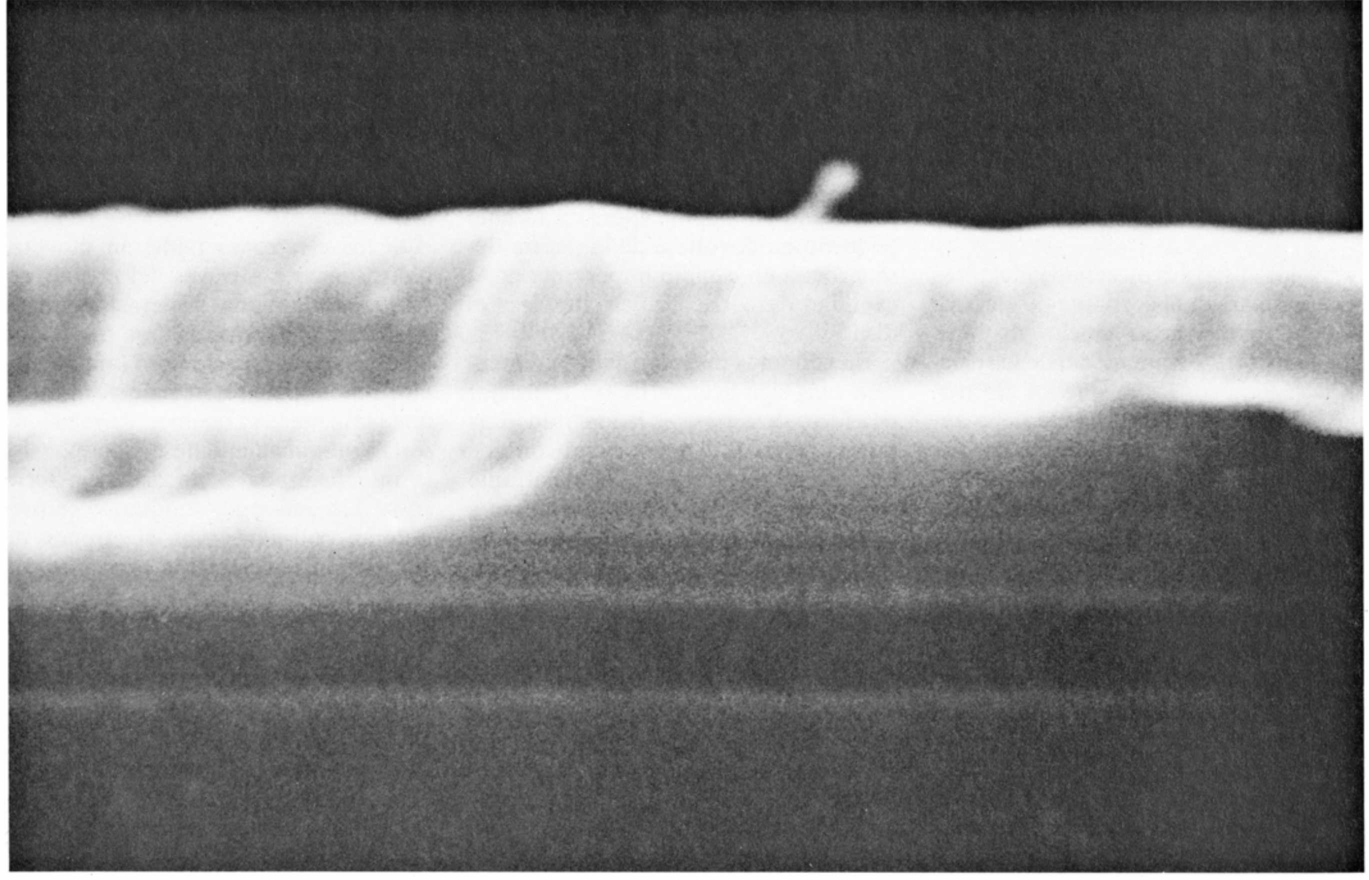
Este movimiento balístico se ha conseguido recientemente. El trabajo de los autores en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de la empresa IBM, en Yorktown Heights, junto con la labor de otros investigadores en diferentes instituciones, ha permitido determinar bajo qué condiciones los electrones se mueven balísticamente y ha conducido a las primeras demostraciones claras del movimiento balístico en dispositivos semiconductores.

Nuestro interés por los electrones balísticos es técnico y científico. Desde el punto de vista técnico, los electrones balísticos podrían servir de base para una generación de dispositivos electrónicos que serían al menos un orden de magnitud más rápidos que los dispositivos actuales. Desde el punto de vista científico, los dispositivos de electrones balísticos posibilitan un nuevo nivel de investigación sobre las propiedades mecánico-cuánticas de los electrones coherentes en semiconductores: al igual que los electrones balísticos de un tubo de televisión, los electrones balísticos en los semiconductores pueden considerarse paquetes mecánico-cuánticos de ondas en libre movimiento; estos paquetes presentan las mismas propiedades ondulatorias (como las interferencias) que las ondas electromagnéticas.

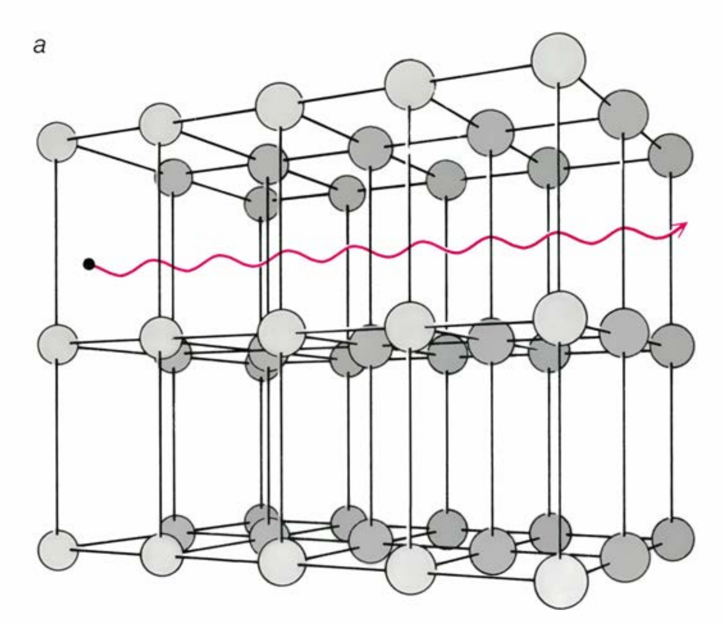
Los electrones se mueven balísticamente en un tubo de vacío porque la distancia que cubren en el interior del mismo es menor que su recorrido libre medio (la distancia que un electrón recorre, por término medio, entre dos colisiones consecutivas con las pocas moléculas gaseosas que existen en el tubo). En los semiconductores es imposible eliminar la dispersión de la misma forma. Por sorprendente que parezca, la densidad de un medio sólido no representa ningún impedimento para el movimiento balístico, a pesar de que los átomos de un semiconductor estén separados entre sí una distancia 10.000 veces menor que las moléculas gaseosas de un tubo de vacío. Los átomos empaquetados en un semiconductor no han de dispersar necesariamente electrones, dado que los átomos de un sólido cristalino están distribuidos en una red periódica, es decir, están espaciados a las mismas distancias, formando una configuración que se repite. De acuerdo con la mecánica cuántica, un electrón puede tratarse matemáticamente, en algunos aspectos, como una onda; en virtud de este comportamiento ondulatorio, un electrón no se dispersa cuando interacciona con una red cristalina perfecta. Tan sorprendente resultado, demostrado por Felix Bloch en 1928, es un concepto básico de la física del estado sólido. (Pero el electrón no se comporta como un electrón libre en el vacío, sino como una partícula más ligera, con una "masa efectiva" menor que la masa del electrón libre y con cierta velocidad máxima; los valores de la masa efectiva y de la velocidad máxima vienen determinados por el medio cristalino donde se desenvuelva el electrón.)

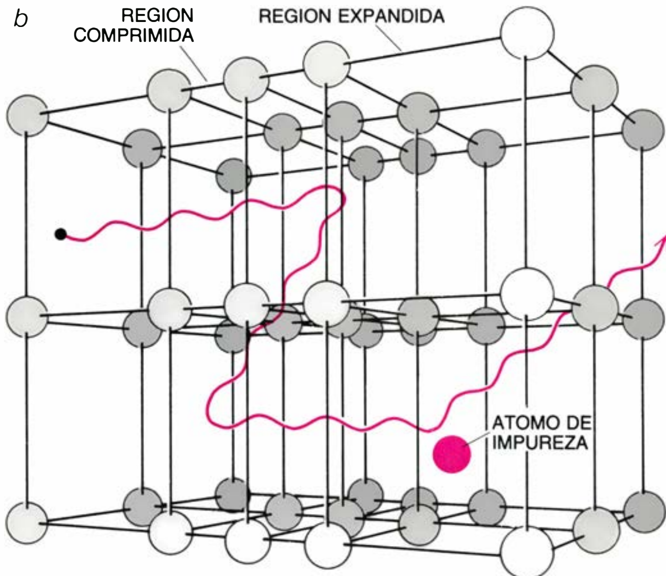
En un cristal ordinario, a cualquier temperatura por encima del cero absoluto, el orden periódico perfecto es tan sólo una aproximación de la disposición real de los átomos. Los átomos del sólido se encuentran siempre en movimiento térmico (el movimiento aleatorio de vibración debido a la energía térmica que suministra el entorno). Las vibraciones térmicas producen ondas de compresión y expansión que se mueven en el seno del cristal; los electrones pueden dispersarse como consecuencia de las ondas, dado que éstas destruyen la ordenación periódica perfecta de los átomos. Cuando un electrón se dispersa como consecuencia de la vibración de una red, toma o cede unas cantidades determinadas de energía del cristal (cuantos). Estos procesos de dispersión se denominan colisiones inelásticas.

En un semiconductor, los electrones pueden dispersarse por las vibraciones de la red y, también, por los iones de impureza que existen siempre en los materiales reales. Los iones de impureza se distribuyen al azar, y no según una ordenación periódica; por tanto, dispersan las ondas electrónicas. Las colisiones con los iones no producen grandes cambios en la energía de los



1. EN UN DISPOSITIVO DE ELECTRONES BALISTICOS los electrones pueden atravesar un canal estrecho sin dispersarse por colisión. Aquí se ilustra un dispositivo de éstos visto desde arriba (*arriba*) y desde un lado (*abajo*). El dispositivo en cuestión está constituido por varias capas de un semiconductor, que corresponden a elementos tales como el emisor de electrones (junto a la parte superior del dispositivo), el canal a través del cual fluyen los electrones y la región donde se recogen los electrones. El tamaño del dispositivo se ha aumentado unas 10.000 veces en la fotografía de la parte superior y unas 100.000 en la fotografía de la parte inferior. Estas imágenes fueron obtenidas por Michael Rosenfield, Carmello Aliotta y Gordon Wilson en el Centro Thomas J. Watson de IBM.





2. DISPERSION DE ELECTRONES: se produce en los semiconductores en virtud de las vibraciones térmicas (vibraciones originadas por el calor) de la red cristalina de los semiconductores y a causa de los átomos de impureza presentes en cualquier semiconductor real. Los átomos de un cristal ideal forman un conjunto estrictamente periódico (*a*). Estos átomos están cargados positivamente, debido a que han proporcionado los electrones de enlace del cristal, y, por tanto, crean un potencial eléctrico que varía periódicamente en el espacio. De acuerdo con la mecánica cuántica, los electrones poseen ciertas características ondulatorias. Los electrones ondulatorios interaccionan con el potencial periódico de suerte tal que pueden atravesar el cristal sin dispersarse. En un cristal real, las vibraciones térmicas producen ondas de compresión y expansión que perturban el potencial periódico (*b*). Los electrones resultan dispersados cuando se mueven en las regiones con potenciales irregulares o interaccionan con los átomos de impurezas existentes en el cristal. (Esquema realizados por George V. Kelvin.)

electrones (debido a que la masa de aquéllos es mucho mayor que la de los electrones), pero alteran la dirección de su movimiento. Estos procesos se denominan colisiones elásticas. Los electrones se dispersan de muchas otras maneras: en colisiones inelásticas con otros electrones o a causa de defectos en la estructura de la red cristalina. Todas estas colisiones acortan el recorrido libre medio de los electrones en los semiconductores.

En los dispositivos semiconductores ordinarios, la corriente de electrones cubre distancias mucho mayores que el recorrido libre medio de los electrones. Para conseguir que los electrones se muevan balísticamente debe aumentarse el recorrido libre medio (escogiendo los materiales semiconductores adecuados y fabricándolos con una pureza muy elevada) o debe reducirse considerablemente el tamaño de la región que atraviesa la corriente en cuestión (utilizando técnicas de fabricación muy refinadas).

El comportamiento complejo que muestran los electrones cuando se mueven a lo largo de recorridos cortos viene ilustrado en un dispositivo semiconductor típico: el transistor de efecto de campo. La aplicación de una diferencia de potencial en un transistor de efecto de campo da lugar a que los electrones se muevan desde una región denominada fuente, a lo largo de una región delgada denominada canal, hasta llegar a una tercera región denominada sumidero [*véase la figura 3*]. Junto al canal existe un contacto metálico: la puerta. La aplicación de un voltaje negativo a la puerta origina un campo eléctrico que repele a los electrones de una parte del canal, dando lugar a la creación de un canal conductor más estrecho con una resistencia mayor, con lo cual se dificulta el paso de corriente desde la fuente hacia el sumidero. En consecuencia, el transistor puede actuar como un amplificador: un cambio pequeño en el voltaje de la puerta desencadena un cambio importante en la cantidad de corriente que atraviesa el dispositivo.

En términos de velocidad, la dimensión más significativa de un transistor de efecto de campo es la longitud de la puerta metálica. La velocidad con que los electrones atraviesan el canal, que está bajo la puerta y entre la fuente y el sumidero, determina la cuantía del tiempo necesario para que el dispositivo responda a los cambios en la tensión de la puerta. En un típico transistor comercial de efecto de campo, la longitud del canal es del orden de un micrometro, de 10 a 100 veces más que el recorrido libre medio de los electrones (según sea el material semiconductor utilizado en la fabricación del dispositivo); por tanto, los electrones no se pueden mover balísticamente.

¿Qué sucede cuando los electrones no se mueven balísticamente desde la fuente hacia el sumidero? Los electrones que salen de la fuente se aceleran primero, debido a la diferencia de potencial existente entre ésta y el sumidero. A una característica distancia de la fuente (aproximadamente igual al recorrido libre medio), la velocidad media de los electrones alcanza un valor máximo. Para distancias mayores, la velocidad media disminuye ligeramente, hasta llegar a un valor estable. La disminución de la velocidad se debe, sobre todo, a las colisiones inelásticas con las vibraciones de la red cristalina.

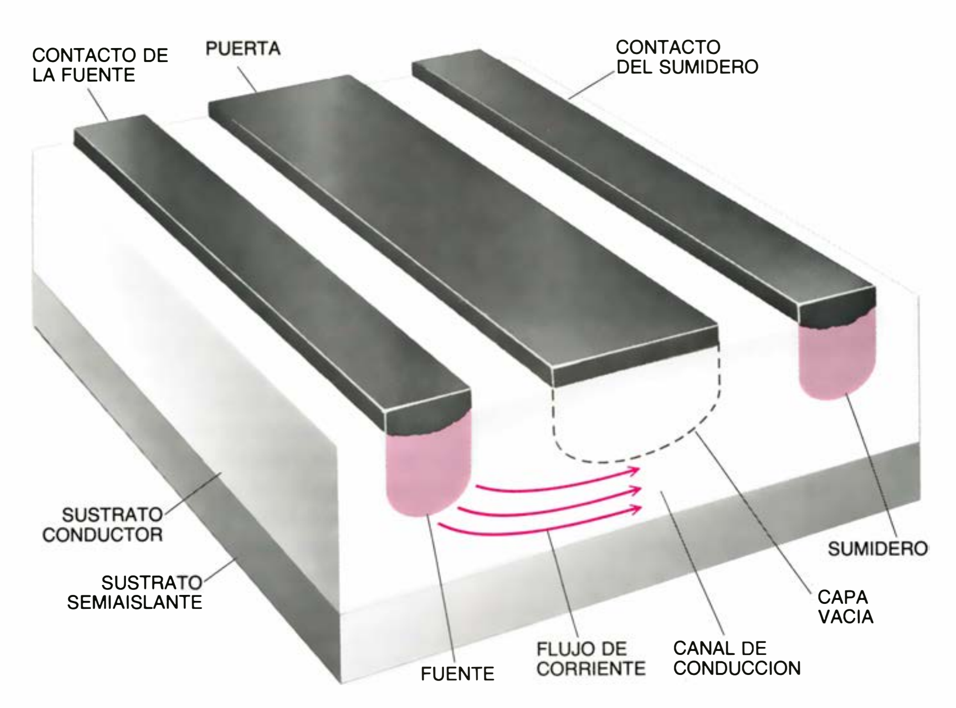
Si los electrones pudieran moverse balísticamente a través del cristal, experimentarían una aceleración inicial similar a la producida por un campo eléctrico en el espacio libre (aunque los electrones de un semiconductor poseen una masa efectiva menor): su velocidad sería aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada de la distancia recorrida. Sin embargo, aunque no se produjeran colisiones, los electrones no sufrirían una aceleración constante. En virtud de la naturaleza de la interacción entre los electrones y la red periódica, los electrones alcanzarían una cierta velocidad máxima. El valor de dicha velocidad viene determinado por la estructura del cristal y por la naturaleza atómica del semiconductor, así como por la dirección en que se mueven los electrones con respecto a la red cristalina.

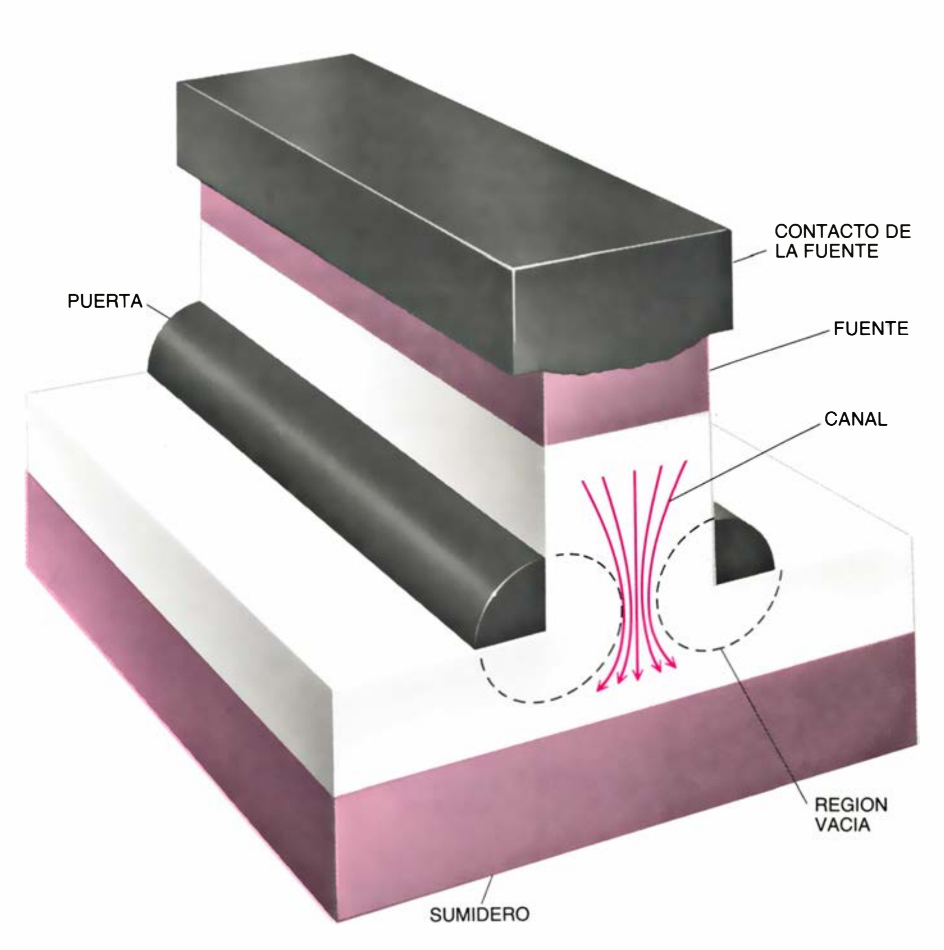
La velocidad media con que se mueve un electrón desde la fuente hasta el sumidero está comprendida entre la velocidad con que abandona la fuente y la velocidad máxima que al-

canza en el semiconductor. Evidentemente, la velocidad media del electrón sería mucho mayor (y el dispositivo podría trabajar mucho más deprisa) si el electrón lograra "ser lanzado" en el canal conductor con su máxima velocidad posible. En los dispositivos balísticos que los autores han fabricado, se ha tratado de alcanzar esta condición. Para comprender la forma en que se lleva a cabo dicho lanzamiento y cómo se fabrican los dispositivos balísticos, es necesario estudiar primero algunas propiedades de los materiales semiconductores.

El semiconductor más corriente es el silicio. Cada uno de los átomos de un cristal de silicio posee cuatro electrones de valencia, cuatro electrones de la capa más externa (estos electrones son los que toman parte en las reacciones químicas), que comparte con los cuatro átomos más próximos. Los electrones actúan como un pegamento y mantienen la estructura del cristal. En ciertos semiconductores compuestos, tales como el arseniuro de galio, uno de los átomos (galio) contribuye con tres electrones de valencia y el otro (arsénico) aporta cinco; en consecuencia, el número medio de electrones de enlace por átomo sigue siendo cuatro. Los electrones no pueden transportar corriente cuando están fuertemente localizados entre dos núcleos; para que un electrón pueda moverse libremente por el cristal, se le debe suministrar cierta cantidad de energía, con lo cual se convierte, de electrón de valencia (ligado), en electrón de conducción (no ligado). En consecuencia, la energía potencial eléctrica de los electrones de conducción es mayor que la de los electrones de valencia, de la misma forma que los satélites que se mueven a gran altura sobre la Tierra poseen una energía potencial gravitatoria mayor que la que poseían en el momento de su lanzamiento. La diferencia entre la energía potencial mínima de los electrones de conducción de un semiconductor y la energía potencial máxima de los electrones de valencia constituye el intervalo entre bandas; su magnitud varía de un semiconductor a otro.

En la mayoría de los semiconductores ordinarios a temperatura ambiente, son pocos los electrones que poseen una energía térmica suficiente para convertirse en electrones de conducción (dicha energía térmica debe ser mayor que la energía del intervalo entre bandas) y, por tanto, la mayoría de los semiconductores puros son muy malos conductores. Para hacer que un semiconductor sea un conductor me-





3. TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO fabricados en diferentes configuraciones. En la habitual (*arriba*), los electrones fluyen a través de un canal conductor, desde una región denominada fuente hacia una región denominada sumidero; ambas regiones están constituidas por un semiconductor muy conductor. Cuando se aplica un voltaje negativo a una "puerta" metálica situada sobre el citado canal, los electrones son eliminados de una región del canal denominada capa vacía. En razón de ello, el canal conductor se estrecha y pasa menos corriente por él. El transistor actúa entonces como un amplificador: un pequeño cambio en la tensión de la puerta produce un cambio importante en la corriente. La velocidad con que el transistor responde a los cambios de voltaje está relacionada directamente con la velocidad con la que se mueven los electrones desde la fuente hacia el sumidero. En un transistor de efecto de campo vertical (*abajo*), que es una configuración más reciente, los elementos están constituidos por una serie de capas delgadas superpuestas. Si el canal está formado por una capa extremadamente delgada, se puede conseguir que el recorrido de los electrones desde la fuente hasta el sumidero sea muy corto (y, por tanto, que la respuesta del dispositivo sea muy rápida). La facilidad con que se obtiene un canal conductor finísimo hace que los transistores de efecto de campo vertical resulten adecuados para los dispositivos de electrones balísticos.

jor, es necesario "contaminarlo" añadiéndole una pequeña cantidad de impurezas. Por ejemplo, el silicio se puede contaminar ("dopar") añadiéndole átomos de un elemento con cinco electrones de valencia, tales como el fósforo o el arsénico. Dado que para el enlace cristalino sólo se necesitan cuatro electrones por átomo, el quinto electrón se puede liberar fácilmente, suministrando una cantidad muy pequeña de energía.

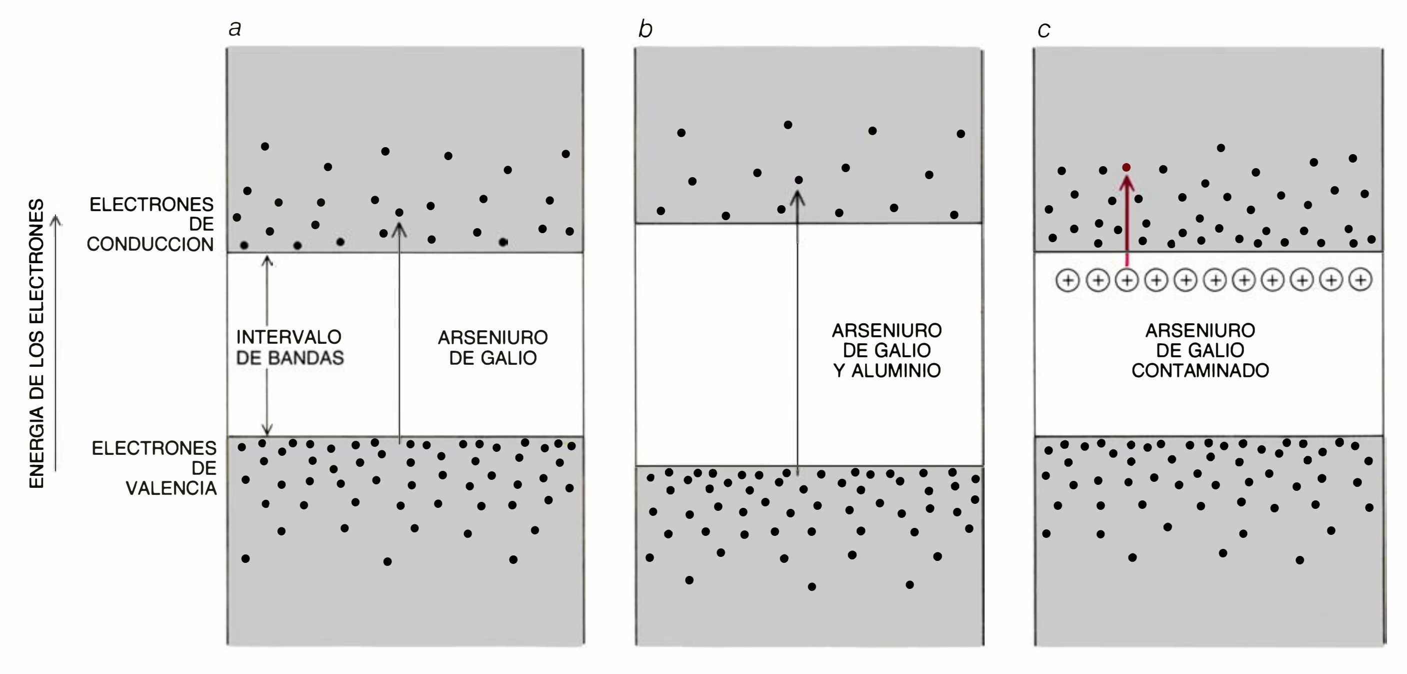
El intervalo de bandas del arseniuro de galio puro es mayor que el del silicio puro y, en consecuencia, este compuesto es un conductor todavía peor que el silicio a temperatura ambiente. Sin embargo, el arseniuro de galio se puede contaminar con el silicio u otros elementos parecidos para hacerlo más conductor; los átomos de silicio remplazan a los átomos de galio, liberando a uno de los cuatro electrones del silicio para contribuir a la conductividad eléctrica. Tal como señaló uno de los autores de este artículo (Eastman), ya en 1977, el arseniuro de galio es uno de los semiconductores más adecuados para crear dispositivos de electrones balísticos. La velocidad máxima de los electrones del arseniuro de galio es mayor que la de los electrones del silicio (en el arseniuro de galio la velocidad máxima es del orden de 10^8 centímetros por segundo, mientras que en el silicio es del orden de 2×10^7 centímetros por segundo), y resulta menos probable que colisionen con las vibraciones de la red cristalina. El recorrido libre medio de un electrón de arseniuro de galio ligeramente dopado es de unos 1000 angstrom (un angstrom equivale a 10^{-10} metros), un valor diez veces mayor que el recorrido libre medio de los electrones en silicio.

La aleación de arseniuro de galio y aluminio es un semiconductor que se utiliza frecuentemente en combinación con el arseniuro de galio. Como el aluminio y el galio tienen el mismo número de electrones de valencia, cuando los átomos de aluminio remplazan a los átomos de galio en la red cristalina no se libera ningún electrón. Se puede sustituir cualquier fracción de átomos de galio por átomos de aluminio. Dado que la estructura de la red del arseniuro de galio y aluminio es similar a la del arseniuro de galio, se puede hacer crecer un cristal de un semiconductor directamente sobre la superficie del otro, de suerte que ambos cristales se ajusten entre sí. Tal configuración se conoce con el nombre de heterounión.

Una de las diferencias más importantes entre el arseniuro de galio y el arseniuro de galio y aluminio se refiere a sus intervalos de bandas. El tamaño del intervalo de bandas en las aleaciones de arseniuro de galio y aluminio es directamente proporcional a la cantidad de aluminio que contienen; por consiguiente, los intervalos de bandas de las aleaciones de arseniuro de galio y aluminio que encierran una proporción elevada de aluminio son mayores que los del arseniuro de galio puro o los de las aleaciones de arseniuro de galio y aluminio con poco aluminio. Así pues, la energía potencial de los electrones de conducción en el lado del arseniuro de galio y aluminio de una heterounión es mayor que la de los electrones en el lado del arseniuro de galio. Cuando los electrones de conducción que se mueven a través del arseniuro de galio y aluminio pasan al arseniuro de galio, su exceso de energía potencial se convierte bruscamente en energía cinética, acelerándose casi instantáneamente hasta alcanzar una velocidad elevada.

Esta heterounión se puede utilizar como inyector de electrones balísticos y representa una solución al problema de acelerar electrones para que alcancen velocidades elevadas antes de entrar en el canal de un transistor, en cuyo seno pueden moverse balísticamente. Existen otras dos clases de inyectores capaces de lanzar electrones a energías elevadas o regulables. Se trata de la barrera de plano de contaminación (una variante de este tipo de inyector sé conoce con el nombre de barrera de camello) y la barrera de túnel.

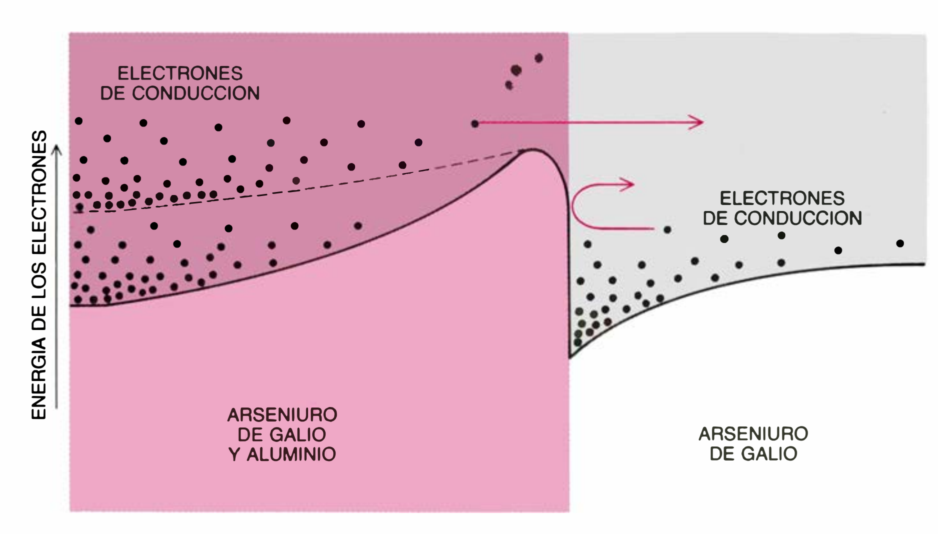
En una barrera de plano de contaminación se forma un plano de iones cargados negativamente (por ejemplo, átomos de berilio —que suelen tener sólo dos electrones de valencia— con un electrón extra) en el interior de una lámina de arseniuro de galio sin con-



4. DIAGRAMAS DE ENERGIA de los semiconductores; nos explican muchas propiedades suyas. El cristal semiconductor mantiene su estructura gracias a los átomos, que comparten electrones de valencia (exteriores). En consecuencia, los electrones implicados en los enlaces están localizados entre los átomos y no pueden moverse para transportar una corriente. Estos electrones deben recibir cierta cantidad de energía para convertirse en electrones de conducción. La diferencia entre la energía de los electrones de valencia y los electrones de conducción, conocida como intervalo de bandas, varía de un semiconductor a otro. Por ejemplo, el intervalo de bandas del arseniuro de galio (*a*) es menor que el del arseniuro de galio y aluminio (*b*). Un semiconductor se puede hacer más conductor "dopándolo", es decir, añadiéndole átomos que tengan más electrones de los necesarios para enlazarse y que, por tanto, proporcionan electrones con facilidad (*c*). Los electrones de los átomos contaminantes (*color*) necesitan menor cantidad de energía para convertirse en electrones de conducción.

taminar; éste, a su vez, se coloca entre dos láminas de arseniuro de galio dopado que contiene una elevada densidad de electrones [*véase la figura 6*]. Los átomos del plano de contaminación (el plano de berilio) forman un plano de cargas eléctricas negativas. El plano de cargas negativas tiende a repeler a los electrones de conducción, que han de poseer cierta energía mínima si quieren atravesar de una región del arseniuro de galio dopado a la otra.

En términos de energía, el plano de berilio representa un máximo de energía potencial. Esta crece a partir de un valor bajo en la región fuertemente dopada que está situada en un extremo del dispositivo, aumenta en la región no contaminada del arseniuro de galio, alcanza un máximo en el plano de los iones negativos y disminuye al llegar al otro extremo de la región no dopada, hasta alcanzar de nuevo un valor bajo en la otra región fuertemente contaminada. La altura del máximo (la cantidad de energía necesaria para atravesarlo) es proporcional al número de iones negativos y puede llegar a ser tan alta como el intervalo de bandas del material. (En una barrera de camello, el berilio está dispersado más ampliamente que en un simple plano, aunque la concentración se produce en una región delgada; por tanto, el máximo de energía se suaviza.) Si el plano de berilio se coloca más cerca de uno de los extremos del arseniuro de galio no dopado que del otro, se puede crear una barrera muy asimétrica, con una pendiente larga y suave en un lado y una pendiente corta y acusada en el otro. Cuando se aplica una tensión negativa en el lado de la barrera de pendiente larga, la energía potencial de los electrones situados en esa región aumenta y los electrones en cuestión se mueven hacia el plano de iones negativos. Todo sucede como si la pendiente suave de la colina se hubiera hecho todavía más suave. Con el tiempo, algunos de los electrones poseen la energía térmica suficiente para atravesar el plano de iones negativos. A medida que descienden por el lado más escarpado del máximo de energía potencial, estos electrones son acelerados rápidamente e inyectados a gran velocidad en la región próxima del arseniuro de galio dopado, siempre que el lado escarpado sea mucho más estrecho que el recorrido libre medio de los electrones.

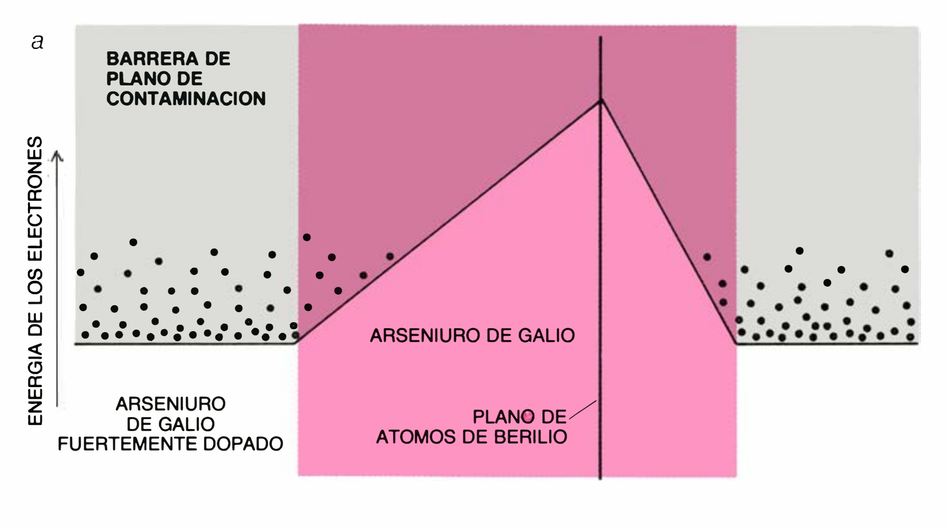


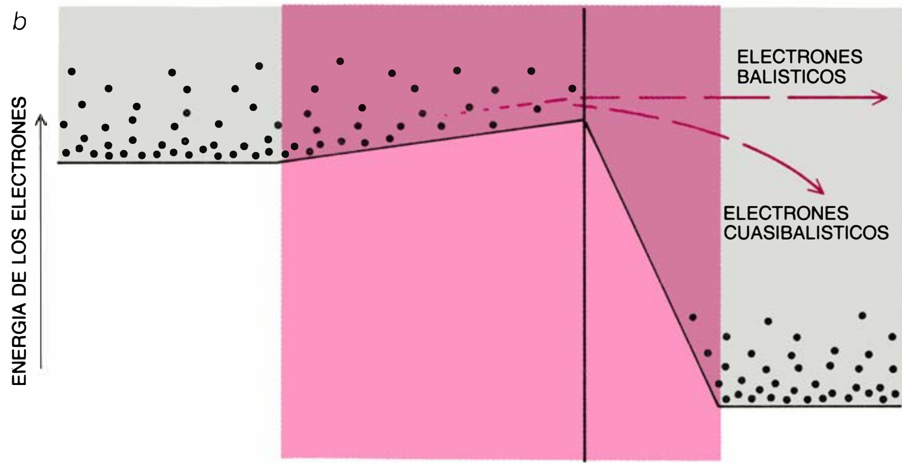
5. POR HETEROUNION se entiende una interfase entre dos semiconductores diferentes unidos entre sí (en este caso, arseniuro de galio y arseniuro de galio y aluminio); representa una forma de inyectar electrones rápidos en uno de los semiconductores. La energía potencial de los electrones de conducción en el arseniuro de galio y aluminio es mayor que en el arseniuro de galio. (La curva en el diagrama de energías de cada semiconductor se debe a la proximidad del otro semiconductor.) Cuando se aplica un voltaje, la función de energía potencial cambia ligeramente (*línea de trazos*) y los electrones se mueven desde el arseniuro de galio y aluminio hacia el arseniuro de galio. Cuando lo hacen, su energía total se mantiene constante, si bien disminuye su energía potencial. En consecuencia, su energía cinética aumenta, es decir, los electrones se mueven más deprisa (*arriba, en color*). En cambio, los electrones del arseniuro de galio, carentes de energía para entrar en el arseniuro de galio y aluminio, se reflejan en la interfase (*en el centro, en color*).

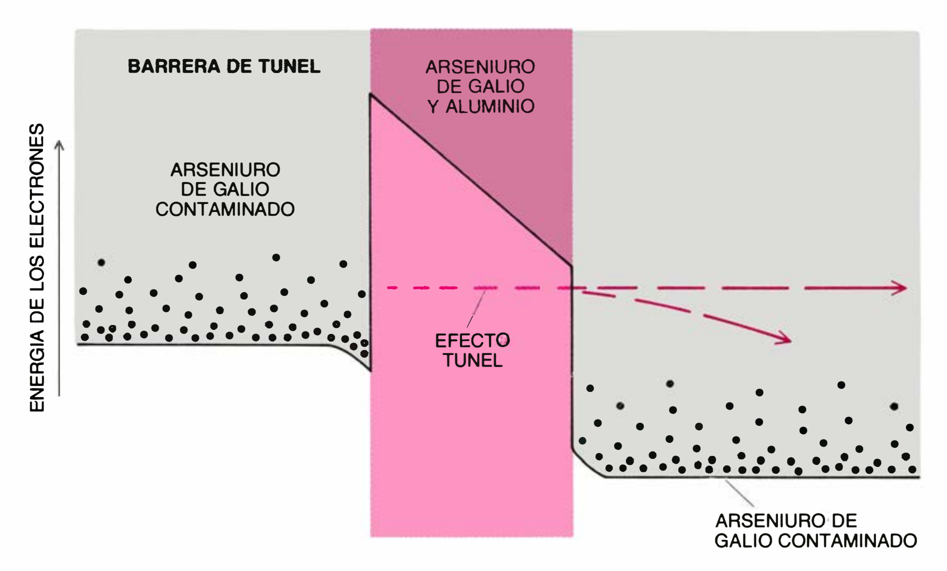
Para construir el otro tipo de inyector de electrones balísticos, la barrera de túnel, se coloca una lámina delgada de arseniuro de galio no dopado entre dos regiones de arseniuro de galio dopado que contengan una alta densidad de electrones. Normalmente, el arseniuro de galio y aluminio se comporta como una barrera que los electrones no pueden atravesar. Ahora bien, si el espesor de la barrera es inferior a los 100 angstroms, existe cierta probabilidad de que los electrones de ambos lados la atraviesen, en virtud del efecto túnel, un proceso mecánico-cuántico. Aunque la probabilidad de que un electrón experimente el efecto túnel es muy pequeña, el elevado número de electrones existentes en el arseniuro de galio dopado hace que el número de electrones que atraviesan la barrera sea elevado. Si no se aplica una diferencia de potencial a las dos regiones de arseniuro de galio contaminado, el número de electrones que atraviesa la barrera en un sentido es, por término medio, exactamente igual al número de los que la atraviesan en el sentido contrario; así pues, no se produce el paso de corriente neta en ningún sentido. Sin embargo, si se establece una diferencia de potencial entre las regiones situadas a ambos lados de la barrera (es decir, si la energía potencial de una de las regiones del arseniuro de galio dopado es mayor que la de la otra región), el número de electrones que atraviesa la barrera por efecto túnel desde la región en la que la energía potencial es más alta supera ampliamente el número de los que la atraviesan en sentido opuesto y, en consecuencia, se produce el paso de corriente.

La probabilidad de que los electrones experimenten el efecto túnel depende, en parte, de la tensión aplicada y del espesor de la barrera. La energía total de los electrones que han atravesado la barrera no cambia, debido a que este efecto es un proceso elástico; por tanto, cuando los electrones pasan por efecto túnel desde una región con energía potencial alta hacia una región con energía potencial baja, su energía cinética aumenta; así, estos electrones se inyectan a gran velocidad. Por otra parte, los electrones que experimentan el efecto túnel tienden a ser los que inciden contra la barrera con velocidad más alta y los que se mueven en direcciones más perpendiculares respecto a dicha barrera. En consecuencia, los electrones inyectados forman un haz de alta energía que está dirigido predominantemente hacia adelante (en dirección perpendicular al plano de la barrera). Además, la energía cinética con la que los electrones emergen depende linealmente de la tensión aplicada; y es fácil de ajustar. La barrera de túnel resulta muy adecuada para los dispositivos de electrones balísticos.

El transistor vertical constituye un dispositivo en el que un inyector de electrones balísticos resulta particularmente útil. En la mayoría de los transistores que existen en el mercado, las regiones de la fuente y el sumidero están encerradas en una muestra horizontal del semiconductor y los electrones pasan de una región a otra formando una corriente paralela a la superficie de la muestra. En un transistor vertical, los elementos individuales del





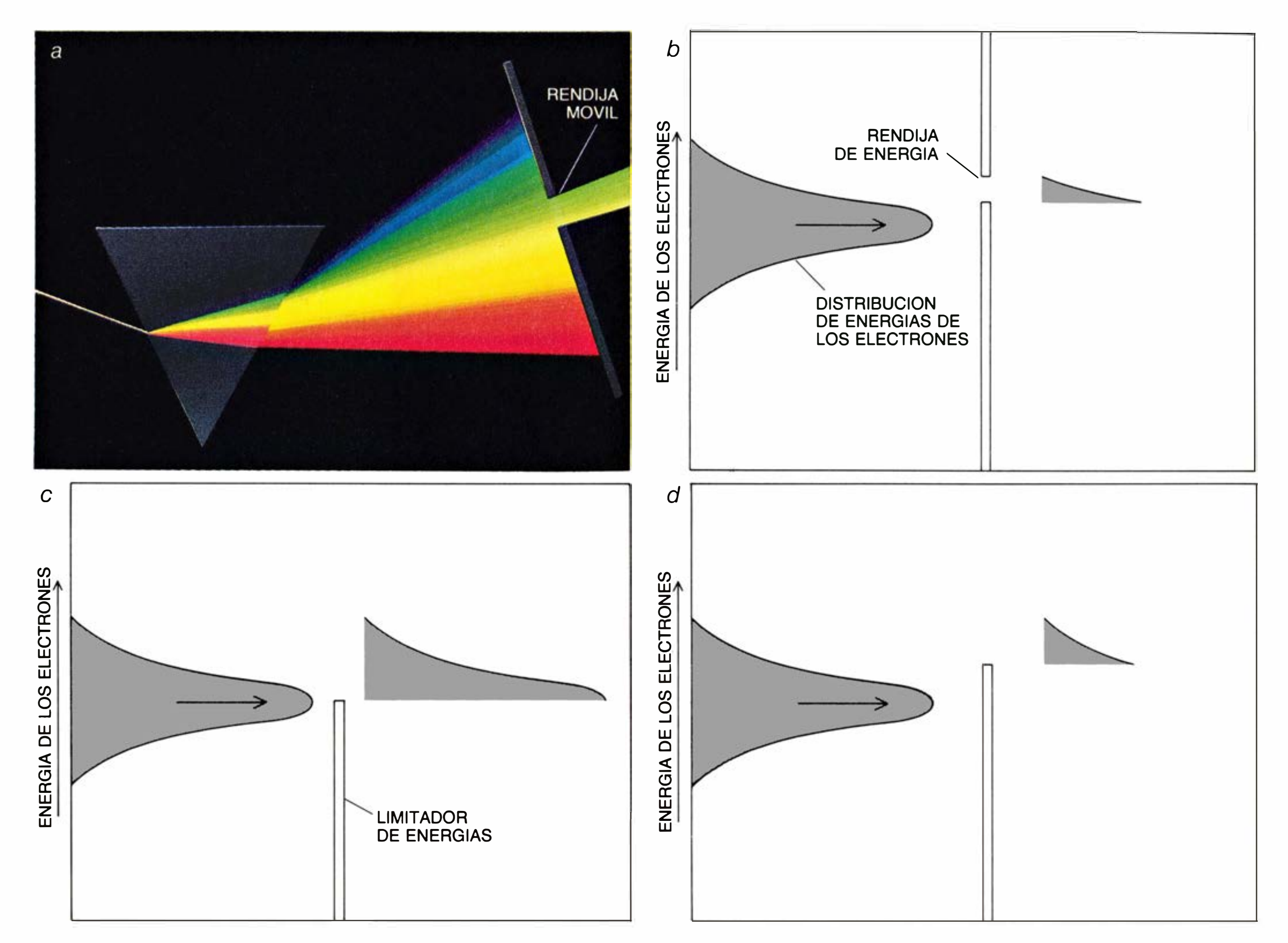


6. INYECTORES DE ELECTRONES BALISTICOS de dos tipos (conocidos como barrera de plano de dopado y barrera de túnel); ambas clases lanzan electrones rápidos sobre un semiconductor. Se obtiene un semiconductor de barrera de plano de contaminación dopando una muestra de arseniuro de galio con un plano de átomos de berilio (*parte superior, a*). El conjunto se coloca entre dos capas de arseniuro de galio dopadas de suerte tal que posean un elevado número de electrones. Los átomos de berilio atraen a los electrones y forman un plano de cargas negativas. Estas cargas negativas crean una "colina" de energía que los electrones no cruzan. Cuando se aplica el voltaje correcto a una de las regiones ricas en electrones (*b*), la energía de sus electrones aumenta y, por tanto, son capaces de cruzar la colina. Cuando llegan al otro lado, su energía potencial se convierte en energía cinética. Algunos electrones sufren colisiones después de cruzar la colina: se dice que se mueven cuasibalísticamente. Un semiconductor de barrera de túnel (*parte inferior*) se obtiene colocando una capa delgada de arseniuro de galio y aluminio entre dos regiones de arseniuro de galio dopado, rico en electrones. Los electrones del arseniuro de galio no pueden entrar en el arseniuro de galio y aluminio, pero existe una pequeña probabilidad mecánico-cuántica de que logren atravesarlo por efecto túnel. Si la diferencia de potencial entre las dos regiones del arseniuro de galio se ajusta de modo que la energía potencial de los electrones sea mayor en una región que en la otra, los electrones atravesarán la barrera por efecto túnel. Podemos modificar la velocidad que llevan los electrones variando la tensión.

dispositivo constan de una serie de capas de un semiconductor depositadas apilándose una encima de otra.

Un transistor vertical de efecto de campo se puede construir en forma de un pedestal delgado vertical. En la parte inferior existe un electrodo; éste se halla debajo mismo de una capa de semiconductor que sirve como sumidero. Las capas que constituyen el canal y la fuente y otros elementos afines se depositan, una a una, en la parte superior de la región del sumidero. Así, un inyector de electrones balísticos de barrera de túnel puede ponerse como fuente desarrollando una capa de arseniuro de galio conductor sobre una capa de arseniuro de galio y aluminio que, a su vez, se ha depositado sobre la parte superior del canal (una capa de arseniuro de galio conductor). El transistor vertical de efecto de campo presenta, además, la ventaja de poder controlar con gran precisión la longitud del canal conductor: para ello, basta con variar el espesor de la capa de semiconductor que forma el canal. En un transistor horizontal, el canal se puede acortar sólo embebiendo estrechamente en el substrato la fuente, la puerta y el sumidero, un proceso mucho más difícil de controlar con precisión que el proceso de crecimiento de una capa delgada de semiconductor. (Sin embargo, la fijación de las puertas de metal en los lados de un pedestal vertical no es tarea fácil.)

El primer dispositivo semiconductor de electrones calientes (dispositivo en el que los electrones experimentan muchas colisiones, y en el que su energía y velocidad son elevadas) fue fabricado, en 1979, por John Shannon en el Laboratorio de Investigación Philips de Inglaterra. Constituido por silicio contaminado, en este dispositivo los electrones se lanzan en el canal conductor mediante un inyector de barrera de camello. Después de atravesar el canal, los electrones han de superar otra barrera de camello antes de llegar al colector. Con esta segunda barrera se pretende impedir que los electrones térmicos de baja energía en el canal (o base, según se le conoce en los dispositivos de electrones calientes) alcancen el colector. La segunda barrera es algo más baja que la del inyector de electrones, con el fin de permitir que pasen electrones aun cuando hayan perdido parte de su energía en las colisiones. Cuando los electrones se inyectaban a energías suficientemente altas, algunos eran capturados; estos electrones habían perdido una cantidad considerable de energía por ser corto el recorrido li-



7. ESPECTROMETROS para medir la distribución de energías de un haz de partículas o de radiación. El primer espectrómetro, diseñado por Isaac Newton, era un prisma (*a*), que descompone la luz blanca en sus diferentes colores integrantes; cada uno de estos colores está formado por fotones con una determinada energía. Una rendija móvil permite que sólo pase a través de ella un color a la vez y hace posible su observación. Moviendo la rendija, podemos establecer la intensidad de cada color y, por tanto, la proporción relativa de fotones de una determinada energía en la luz original. Un dispositivo análogo para analizar espectroscópicamente un haz de electrones consiste en una "rendija de energía", que sólo permite el paso de aquellos electrones cuya energía se sitúa dentro de cierto intervalo (*b*). Resulta más sencillo diseñar un "limitador de energía" que permita el paso de todos los electrones cuya energía supere determinado valor (*c*). Elevando el valor de dicho límite (*d*) y midiendo el cambio en el número de electrones que pasan en cada caso, conoceremos la composición del haz.

bre medio de los electrones en el silicio.

El transistor de Shannon fue seguido por un transistor de arseniuro de galio fabricado, en 1981, por Roger Malik, Marc Hollis y Susan Palmateer, de la Universidad de Cornell. Este dispositivo estaba formado por dos barreras planas dopadas con berilio: una, elevada, actuaba de inyector de electrones rápidos en la fuente (que lanza los electrones a través del dispositivo con la mayor velocidad posible) y otra, más baja, en el sumidero. Al igual que Shannon, estos investigadores estudiaron el transporte de electrones rápidos, pero no se ocuparon del transporte balístico en particular.

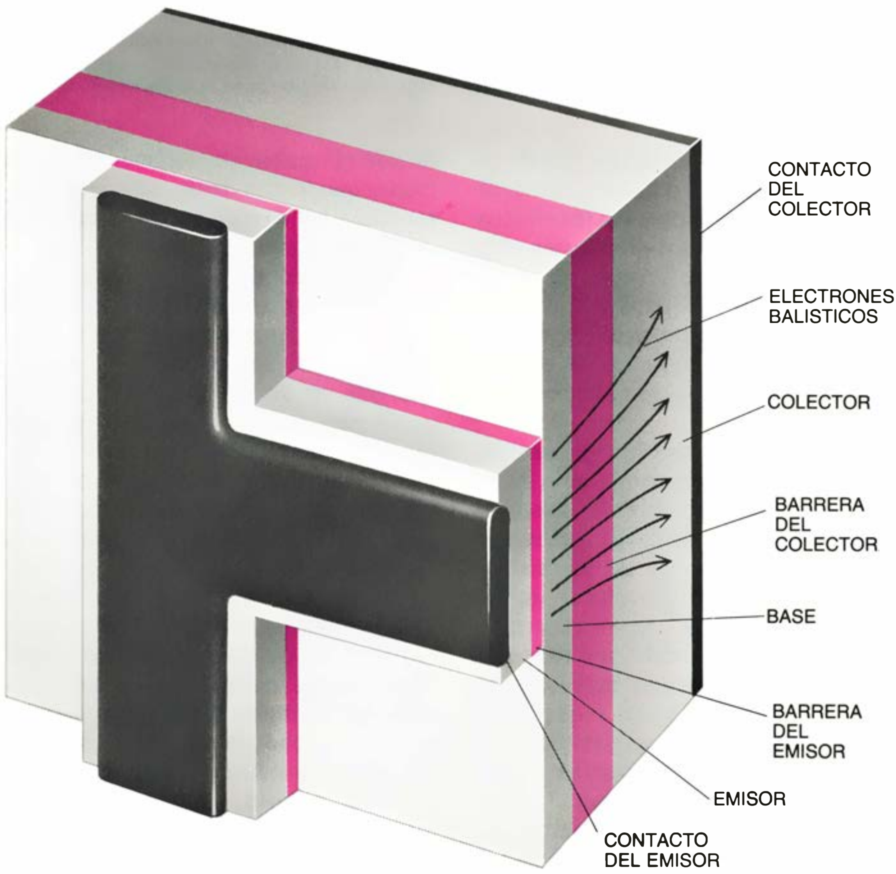
Hasta hace poco, resultaba muy difícil demostrar por vía experimental que el transporte balístico se había producido o determinar experimentalmente la fracción de electrones que había atravesado balísticamente un dispositivo. Para ello es necesario conocer la distribución de energías (medir los sucesos de difusión inelástica) y las direcciones en que se mueven los electrones (medir los sucesos de difusión elástica), una vez que dichos electrones han completado su paso a través del transistor, y compararlas con la energía y la dirección que poseían los electrones cuando entraron en el dispositivo.

La medida de la distribución de energía de un haz de partículas o de radiación recibe el nombre de espectroscopía. Una forma de llevar a cabo medidas espectroscópicas de un haz de electrones consiste en colocar un "limitador de energía" en su recorrido. Este dispositivo permite que todos los electrones con energías mayores que cierto valor lo atraviesen y que todos los electrones con energías menores que ese valor sean rechazados. Alterando gradualmente la "altura" de dicho limitador (es decir, la energía mínima necesaria para atravesarlo) y midiendo el cambio en el número de electrones que lo atraviesan, se pueden determinar las concentraciones relativas de las diferentes energías en el haz.

Un limitador de energía sencillo consiste en una placa colectora conectada a un voltaje negativo que repele a los electrones. Tan sólo los electrones con energías lo suficientemente elevadas como para superar la fuerza repulsiva (es decir, capaces de pasar sobre la barrera de potencial, cuya altura es igual a la tensión aplicada) puede entrar en la placa y medirse como corriente. La altura del limitador de energía se puede modificar con facilidad cambiando el voltaje aplicado a la placa colectora.

¿Cómo se puede construir un espectrómetro que sea sensible a la dirección en la que se mueven los electrones, así como a su energía total? Un sencillo ejemplo demuestra conceptualmente la forma de hacerlo. Supongamos que se dispara un proyectil sobre una pared lisa y gruesa. El proyectil atravesará la

ELECTRONES
BALISTICOS INYECTADOS
LIMITE DE ENERGIA
ELECTRONES
PARCIALMENTE
TERMALIZADOS
ENERGIA DE LOS ELECTRONES
ELECTRONES
TERMICOS
EMISOR
BASE
COLECTOR
BARRERA
DEL EMISOR
BARRERA DEL COLECTOR
100 ANGSTROM
1000 ANGSTROM



8. DISPOSITIVO THETA; así se abrevia el amplificador por efecto túnel de transferencia de electrones calientes. Se utiliza para producir y detectar electrones balísticos. El diagrama energético de este dispositivo (*arriba*) sirve para ilustrar la forma en que opera. Los electrones de un emisor se mantienen con energía elevada. Algunos de ellos atraviesan una barrera por efecto túnel y se mueven balísticamente a través del canal conductor (la llamada "base"). Otros electrones no se mueven balísticamente, sino que se dispersan y se "termalizan" (su energía se acerca a la energía de equilibrio de los electrones de conducción que existen en la base). Una barrera impide la llegada al colector de los electrones no balísticos. La barrera del colector puede usarse de espectrómetro: ajustando el voltaje del colector se crea un limitador de energía. De este modo, se determina la distribución de energías de los electrones que se mueven a través del dispositivo y se compara con la distribución de energías que tenían dichos electrones cuando se lanzaron inicialmente desde el emisor.

pared, si su energía supera determinado valor mínimo. Pero si el proyectil se desvía en vuelo, de forma tal que no se mueva en una dirección exactamente perpendicular a la pared, tendrá que recorrer una distancia mayor en el interior de la pared; el proyectil tendrá que atravesar, de hecho, una pared más gruesa, y para conseguirlo necesitará poseer mayor energía. Por tanto, una pared gruesa y plana mide algo más específico que la energía total del proyectil: mide la cantidad de energía del proyectil que se invierte en su movimiento perpendicular a la pared.

En un material semiconductor, se substituyen los proyectiles por electrones y, la pared gruesa y plana, por una barrera de energía potencial (que podría ser una versión más gruesa de la barrera de túnel que existe en algunos inyectores de electrones calientes). La altura de la barrera de energía potencial representa la energía mínima que debería adquirir un electrón que viajara perpendicularmente a la barrera para cruzarla. Si la barrera es gruesa, la probabilidad de que se produzca el efecto túnel es pequeña y puede ignorarse. La distribución de energía asociada con el movimiento hacia adelante de los electrones se puede determinar cambiando la altura de la barrera y contando el número de electrones que, al atravesar dicha barrera, contribuyen a la corriente.

Un dispositivo propuesto en 1981 por uno de los autores (Heiblum) resulta particularmente adecuado para este tipo de espectroscopía, dado que se basa en un haz de electrones bien colimado que posee una distribución de energía perfectamente conocida. La realización de medidas de espectroscopía con este dispositivo permite comparar las condiciones iniciales y finales del haz de electrones y determinar directamente las pérdidas de energía o el cambio de dirección que se producen cuando los electrones atraviesan el dispositivo. El dispositivo en cuestión se conoce con el nombre de THETA, iniciales, en su versión inglesa, de "amplificador por efecto túnel de transferencia de electrones calientes".

La mayoría de los dispositivos THETA que se han fabricado hasta ahora han utilizado arseniuro de galio y arseniuro de galio y aluminio. Estos dispositivos los ha construido un grupo de los Laboratorios Fujitsu, del Japón, y también Heiblum y sus colaboradores en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de la empresa IBM. En el dispositivo THETA, una barrera de túnel inyecta electrones con velocidad muy elevada en una capa conductora delgada, la base. Esta última consiste en arseniuro de galio que se ha vuelto conductor gracias a un dopado con átomos de silicio, suministradores de los electrones "fríos" (es decir, electrones en equilibrio térmico con la red cristalina), que permiten la aplicación de una diferencia de potencial a lo largo de la barrera de túnel. Las energías de los electrones inyectados se distribuyen dentro de un intervalo bastante estrecho en torno a una energía central que viene determinada por la tensión aplicada al inyector de túnel.

El espesor de la base es del mismo orden o ligeramente menor que el recorrido libre medio de los electrones calientes; por consiguiente, muchos de ellos la atraviesan balísticamente. En el otro extremo de esta base delgada existe una capa de barrera gruesa formada con arseniuro de galio y aluminio. Esta barrera impide que los electrones fríos salgan de la base por efecto túnel; sí pueden superarla, en cambio, los electrones rápidos que han atravesado la base balísticamente. Al otro lado de la barrera, otra capa de arseniuro de galio conductor sirve de colector. En éste, los electrones pierden la mayor parte de su energía cinética, en virtud de una serie de procesos de dispersión y se dirigen hacia el electrodo positivo de la batería [*véase la figura 8*].

Para utilizar el dispositivo THETA como un espectrómetro limitador, se inyectan electrones calientes, con una distribución de energías conocida, en la base delgada y, al mismo tiempo, se procede a aumentar gradualmente la altura de la gruesa barrera de potencial. Dicha altura se eleva al aplicar una tensión negativa (que repele los electrones) al colector. El límite del espectrómetro corresponde al lado de la capa gruesa de arseniuro de galio y aluminio que se encuentra más próxima al colector, puesto que éste es el lugar donde la barrera de energía potencial es más elevada y puesto que sólo los electrones con una energía igual o mayor que la altura de la barrera lograrán atravesar toda la capa de arseniuro de galio, entrando en el colector.

A medida que la altura de la barrera aumenta, la corriente que llega al colector disminuye. La variación de la corriente que se produce al modificar la altura de la barrera es proporcional al número de electrones cuya energía (en realidad, la energía asociada con el movimiento perpendicular a la barrera) es mayor que la energía necesaria para superar la barrera antes de que su altura cambie, pero menor que la energía necesaria para superar dicha barrera después de que se haya modificado su altura. En consecuencia, variando la altura de la barrera conoceremos la distribución de las energías de los electrones que han atravesado el dispositivo.

En algunos experimentos de este tipo, el número y el espectro de los electrones capturados coinciden extraordinariamente bien con las características del haz inyectado. Los resultados espectroscópicos constituyen una prueba directa de que los electrones se han movido balísticamente a través de la capa conductora de arseniuro de galio y a través de la capa gruesa de arseniuro de galio y aluminio. Estos experimentos han permitido obtener, por primera vez, una distribución de energías tan estrecha para los electrones que han atravesado un dispositivo semiconductor. Esta es, también, la primera vez que las características de los electrones emergentes muestran una semejanza tan profunda con las de los electrones inyectados.

Aunque los dispositivos THETA, al igual que otros dispositivos de electrones balísticos, pueden tener aplicación en componentes semiconductores comerciales, ya han demostrado su utilidad como herramientas científicas en la investigación del comportamiento de los electrones en los semiconductores. Los mecanismos que rigen el paso de un electrón a través de un semiconductor no se conocen bien; los dispositivos de semiconductores balísticos proporcionan a los investigadores la posibilidad de cambiar algunas condiciones en el interior de los semiconductores y medir el efecto de tales cambios sobre el paso de electrones.

Por ejemplo, en los dispositivos THETA no todos los electrones inyectados atraviesan la base balísticamente. Sin embargo, en una aparente paradoja, si la base se hace menos conductora disminuyendo la cantidad de átomos contaminantes, el número de electrones balísticos aumenta. Este resultado pone de manifiesto que los electrones calientes que atraviesan la base interaccionan con los electrones fríos que constituyen la base conductora (y quizá también con los átomos contaminantes). No está todavía claro cuál podría ser esa interacción.

En otro ejemplo, si la base del dispositivo THETA se hace más gruesa, la distribución de energías de los electrones balísticos no cambia de forma, aunque disminuye el número total de electrones balísticos. Esto demuestra que, en cada suceso de dispersión, un solo electrón caliente se ha visto afectado,

separándose totalmente de la distribución de electrones balísticos. En otras palabras, no tienen lugar los sucesos de dispersión de ángulo pequeño o los sucesos de dispersión inelástica en los que las pérdidas de energía sean mínimas. Todas las colisiones presentan un carácter "traumático" y convierten a un electrón caliente en otro frío.

Otro campo de estudio en el que los dispositivos de electrones balísticos pueden constituir instrumentos experimentales de gran valor es el de la investigación de las propiedades mecánico-cuánticas del electrón. Cuando los electrones se dispersan, concretamente cuando lo hacen de manera inelástica, pierden parte de la "memoria" de sus propiedades ondulatorias anteriores. En particular, los electrones pierden información sobre la fase de la onda. Por otro lado, los electrones balísticos se mueven a través de un medio sólido sin dispersarse y mantienen su naturaleza ondulatoria. En los electrones balísticos, se puede investigar el movimiento de la onda asociada en el tiempo y en el espacio. La relación entre las ondas asociadas a dos electrones balísticos se mantiene constante en tanto los electrones sean balísticos.

El comportamiento ondulatorio de los electrones balísticos en los semiconductores puede estudiarse por analogía con las ondas del agua y las ondas luminosas. Cuando una onda de agua colisiona contra una pared sólida, se refleja: se crea otra onda que se mueve hacia atrás, en dirección a la fuente de la onda original. La onda que avanza se interfiere con la onda que se dirige hacia atrás. En los lugares donde la cresta de una onda coincide con la cresta de la otra, la amplitud total aumenta; este fenómeno se conoce con el nombre de interferencia constructiva. De forma análoga, en los lugares donde el valle de una onda coincide con la cresta de la otra, o viceversa, la amplitud total disminuye; este fenómeno se conoce con el nombre de interferencia destructiva. Cuando pasan de un medio a otro (aire y vidrio), las ondas luminosas se reflejan parcialmente: parte de la luz atraviesa la superficie de separación entre los dos medios y otra parte se refleja en dicha superficie, creando una onda que puede interferir con la onda original. De modo análogo, cuando los electrones balísticos pasan del arseniuro de galio y aluminio al arseniuro de galio o del arseniuro de galio al arseniuro de galio y aluminio, parte de la onda asociada a los electrones atraviesa la barrera y parte se refleja en ella, para volver hacia la fuente de los electrones.

Tal interferencia entre las ondas de los electrones que se mueven hacia adelante y hacia atrás se pone de manifiesto en los dispositivos THETA. Cuando los electrones balísticos atraviesan la base delgada se producen reflexiones mecánico-cuánticas en la interfase de la base y el colector. Dado que la longitud de onda de la onda asociada de un electrón depende de su energía, los efectos de interferencia producidos por las reflexiones vendrán condicionados por la energía de los electrones inyectados. Para ciertas energías de inyección, las ondas electrónicas reflejadas retornan al inyector de túnel, de forma tal que están exactamente en fase con las ondas que emergen por primera vez del inyector (es decir, ambas ondas se solapan exactamente). En este caso, la onda de retorno refuerza a la onda de avance, interfiriéndose constructivamente con ella; en virtud de ello, aumenta la corriente que fluye hacia el colector. Para otras energías, las ondas se interfieren destructivamente, y la onda de retorno elimina parcialmente a la de avance. Por tanto, la corriente que llega al colector disminuye. Estos efectos cuánticos originan máximos y mínimos en la corriente que fluye a través del dispositivo, fácilmente observables al variar la energía de los electrones inyectados.

El hecho de que en los cristales muy puros, a temperaturas próximas al cero absoluto, los electrones puedan recorrer, en teoría, grandes distancias sin dispersarse entre la densa red de átomos resulta sorprendente y contrario a nuestra intuición cotidiana. Sin embargo, y en cierto sentido, resulta todavía más increíble que los electrones atraviesen dispositivos reales sin dispersarse, sobre todo si tenemos en cuenta que estos dispositivos están constituidos por sustancias impuras y operan a temperaturas muy superiores al cero absoluto.

La demostración de que los electrones pueden moverse balísticamente reviste interés en múltiples aspectos. Como hemos visto, la naturaleza ondulatoria de los electrones balísticos proporciona nuevas herramientas a los investigadores para estudiar el comportamiento de los electrones en los sólidos y comprobar la naturaleza mecánico-cuántica de los electrones. En un dominio más práctico, los electrones balísticos de los semiconductores permiten diseñar nuevos dispositivos cuánticos capaces de operar a velocidades muy superiores a las que utilizan los dispositivos electrónicos de la presente generación.

Ballenas y morsas, labradoras del fondo marino

Cuando las ballenas grises y las morsas del Pacífico acopian alimento del fondo del mar de Bering nororiental, labran surcos que rivalizan con las perturbaciones producidas por los procesos geológicos

C. Hans Nelson y Kirk R. Johnson

A finales de la década de 1970, durante un reconocimiento del fondo nororiental del mar de Bering en busca de factores geológicos que pudieran suponer un peligro para futuros oleoductos y plataformas petrolíferas costeras, uno de los autores (Nelson) se topó con un sorprendente hallazgo. Además de los peligros esperados (fallas activas, estrías de hielo y erosión por corrientes), obtuvo pruebas de que el suelo marino estaba arañado por surcos y hoyos que no podían atribuirse a ningún proceso geológico conocido. Sabedor de que muchos mamíferos marinos viven o visitan periódicamente las aguas someras (que rara vez superan los 50 metros de profundidad) situadas entre Siberia y Alaska, Nelson se planteó la posibilidad de que esas estructuras fueran obra de alguno de esos animales. No se equivocó. Hemos descubierto que las ballenas grises de California cavan los hoyos y las morsas del Pacífico aran los surcos. Durante ese proceso, los animales incorporan bastante más sedimento a las aguas del mar de Bering nororiental que el río Yukon, que cada año descarga en la región más de 60 millones de toneladas métricas de materiales de arrastre.

Ballenas y morsas modifican el fondo en sus incursiones en busca de alimento por la plataforma continental. En la caza de su bocado favorito, un anfípodo ampelíscido, crustáceo bentónico [*véase la figura 6*], las ballenas excavan extensas parcelas de sedimento de la plataforma de Bering. Las morsas del Pacífico remueven el sedimento a la captura de almejas y otras 60 especies de presa bentónicas. Pese al aspecto de campo de batalla que ofrece el suelo marino, la actividad alimentaria de las ballenas y las morsas parece resultar benéfica para la zona, pues incrementa su productividad.

Las morsas, cuyos efectivos se cifran en unos 200.000 individuos, son habitantes permanentes de los mares de Bering y Chukchi. Las ballenas, en cambio, son visitantes transitorios. Cada marzo, unas 16.000 abandonan los territorios de cría a la altura de Baja California y recorren más de 8000 kilómetros, costa del Pacífico arriba, para nutrirse. Cuando alcanzan el mar de Bering nororiental, un importante territorio de alimentación, el hielo invernal ya se ha fundido y las aguas estivales, relativamente calmas, bullen de vida. (Las ballenas se alimentan también en otras zonas del mar de Bering y en el vecino mar de Chukchi.) De mayo a noviembre, los cetáceos se entregan a un imponente festín que constituye el grueso de su sustento anual.

Nelson y sus colaboradores descubrieron las misteriosas estructuras al analizar datos obtenidos por sonografía de barrido lateral. En la toma de un sonograma de barrido lateral se emplea un transductor subacuático con forma de torpedo que va arrastrado por un barco. El transductor dirige un abanico de impulsos sonoros al fondo marino y capta las señales de retorno, cuya intensidad varía en función de la reflectancia acústica del relieve y de la distancia que las separa del aparato transductor. Las señales de retorno se transmiten al barco, donde un registrador las plasma en una sonografía: una imagen que guarda cierto parecido con las fotografías aéreas de la superficie terrestre.



1. BALLENA GRIS DE CALIFORNIA, que emite un chorro de agua fangosa por la boca a medida que va filtrando el sedimento en busca de presas. El ejemplar es representativo de los aproximadamente 16.000 que se alimentan en el mar de Bering nororiental, tragando y expeliendo enormes bocanadas de sedimento. En pos de esas presas bentónicas, cavan hoyos ovalados y someros en el suelo. En esa misma región, unas 200.000 morsas del Pacífico se alimentan de animales bentónicos; en su búsqueda de presas, las morsas aran surcos estrechos.

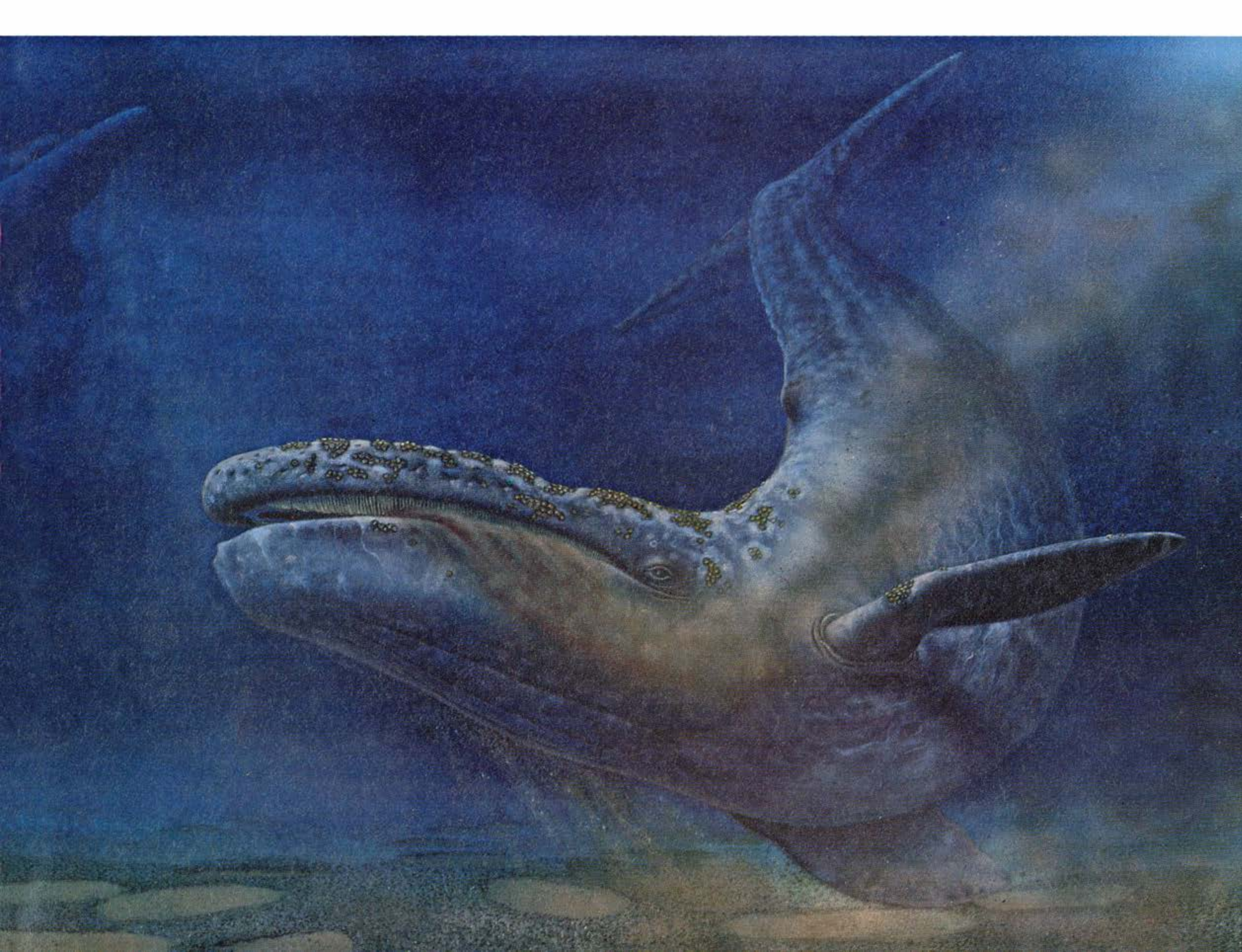
De inmediato se sospechó que esas perturbaciones recién descubiertas podrían ser obra de la ballena gris. (La participación de las morsas se descubriría posteriormente.) En efecto, desde hacía tiempo se poseían indicios de que las ballenas se alimentaban de animales que habitaban en el fondo marino. Según relatos de balleneros del siglo XIX, de la boca de esos cetáceos salían chorros de agua fangosa. Al descuartizarlos, el estómago aparecía lleno de gran cantidad de crustáceos bentónicos, que los investigadores han identificado ulteriormente como anfípodos ampelíscidos.

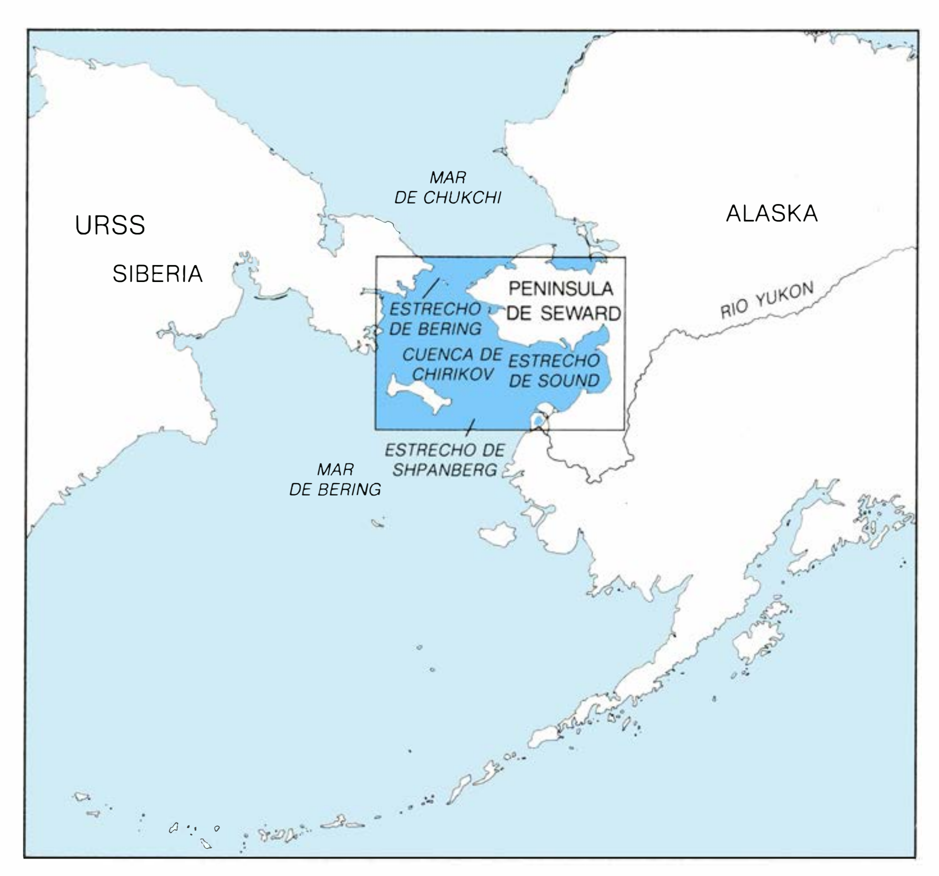
Para alimentarse en el suelo marino, la ballena se tiende de costado, con la boca paralela al lecho; retrae su enorme lengua y así crea una fuerza de succión que aspira, por un lado de la boca, una bocanada de sedimento rico en fauna. Acto seguido, lo filtra hacia el lado opuesto, a través de las "ballenas": una serie de láminas córneas que cuelgan a ambos lados de la mandíbula superior y crean una estructura en peine. El interior cerdoso de la "ballena" atrapa las presas, que el animal traga seguidamente. Unas veces, las ballenas expelen los chorros de sedimento cerca del fondo; otras, los sueltan cerca de la superficie, cuando suben a buscar aire. (Aunque las ballenas prefieren sin duda los anfípodos, ingieren gran variedad de presas, incluidos los organismos que viven en la columna de agua.)

Otros dos hallazgos apuntaban a las ballenas como causa específica de las perturbaciones del fondo marino advertidas en la cuenca de Chirikov, una región de 30 a 50 metros de profundidad situada en el centro de la plataforma nororiental de Bering. En 1979, un equipo de observadores aéreos que seguía la trayectoria de las ballenas grises por las "plumas" de fango que desprendían al alimentarse, descubrieron que se concentraban en la cuenca de Chirikov. Nelson había analizado también el sedimento de diversos puntos de la plataforma de Bering, así como la fauna que medraba en él. Sus datos revelaron que una capa de arena que cubría la cuenca de Chirikov estaba habitada por la presa favorita de las ballenas: los anfípodos. Más aún, la extensión de la capa coincidía con la zona de la cuenca donde se habían avistado ballenas.

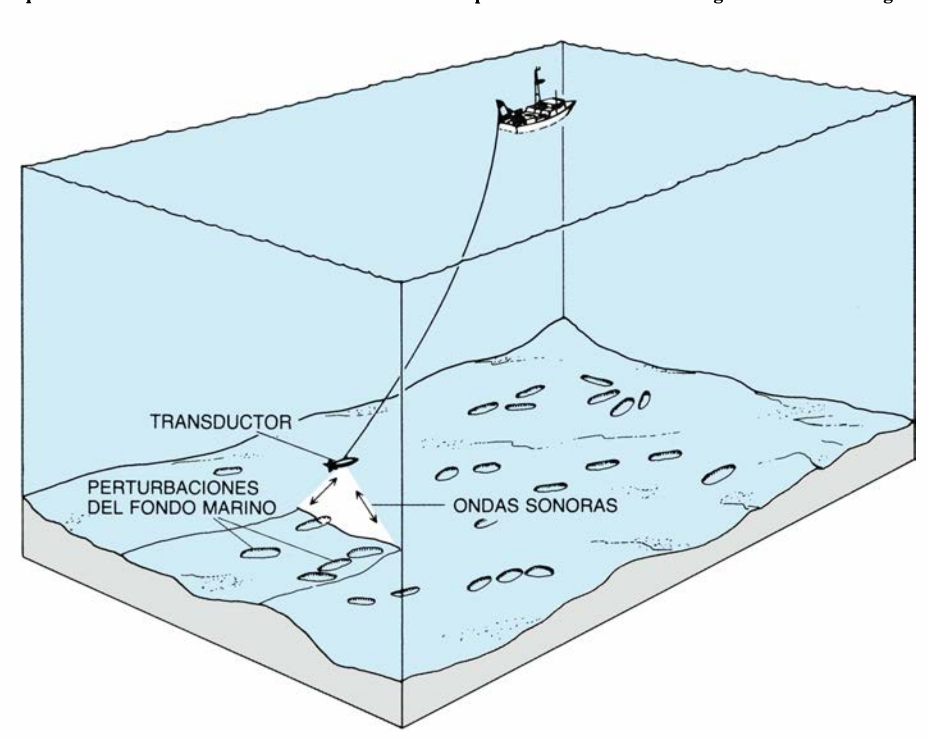
Para determinar las clases de sedimento y la fauna asociada al área de estudio, Nelson había recogido muestras sirviéndose de los llamados "testigos de caja", cada uno de los cuales cubría una extensión de 20 por 30 centímetros de fondo marino y penetraba unos 50 lecho abajo. En las imágenes de rayos X de cortes de las muestras se distinguían las galerías excavadas por los animales bentónicos y, a partir de ese dato, se determinó la fauna albergada por el sedimento.

Según se comprobó, el fondo de la cuenca de Chirikov estaba cubierto por dos metros de arena depositada al término del último período glacial (hace unos 10.000 o 12.000 años). Al fundirse el hielo se elevó el nivel del mar, inundando terrenos que otrora estaban emergidos. Los anfípodos son los organismos excavadores que más abundan en ese antiguo estrato de arena; construyen allí, con gran habilidad, los tubos revestidos de moco donde viven,





2. MAR DE BERING NORORIENTAL (*recuadro*), situado en la punta del océano Pacífico, entre la Unión Soviética y Alaska. Constituye uno de los principales territorios de alimentación de la ballena gris de California y de la morsa del Pacífico. Las ballenas emigran a esa región cada verano desde sus territorios de cría, a la altura de Baja California, México, y concentran su forraje en la cuenca de Chirikov. Las morsas viven en el norte y se alimentan durante parte del año en su cuenca o cerca de ella. Las aguas del mar de Bering nororiental son someras (rara vez superan los 50 metros de profundidad), lo que permite a los mamíferos que se alimentan de animales del fondo alcanzar la superficie en busca de aire sin gastar excesiva energía.



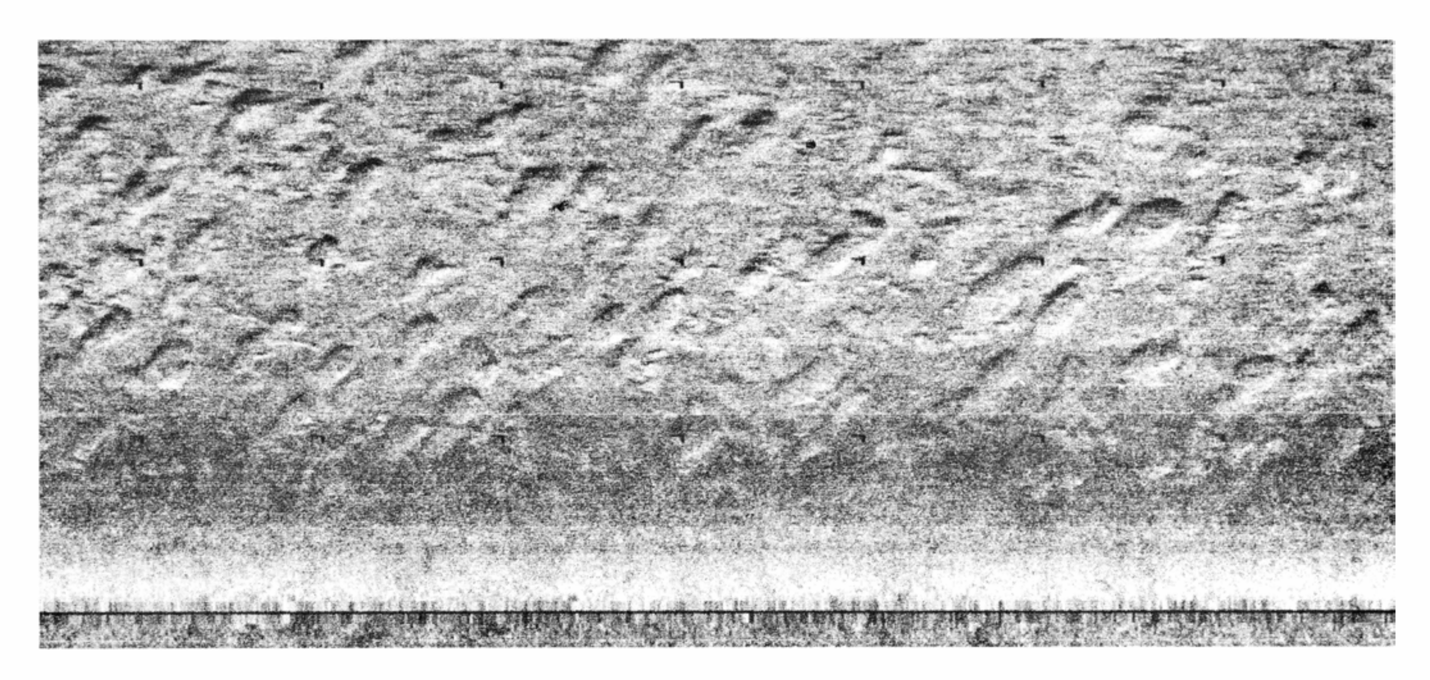
3. SONOGRAFIA DE BARRIDO LATERAL, técnica del trazado del relieve topográfico que proporcionó el primer indicio de que las ballenas y las morsas remueven profundamente el fondo marino en busca de alimento. Un barco remolca un transductor sumergido con forma de torpedo. El transductor envía ondas sonoras al fondo del mar y recibe las señales de retorno, que varían de intensidad según la forma y densidad del relieve que encuentran a su paso. Esas señales se retransmiten de inmediato a un registrador situado a bordo, que las traduce a un sonograma: una imagen que guarda cierto parecido con una fotografía aérea.

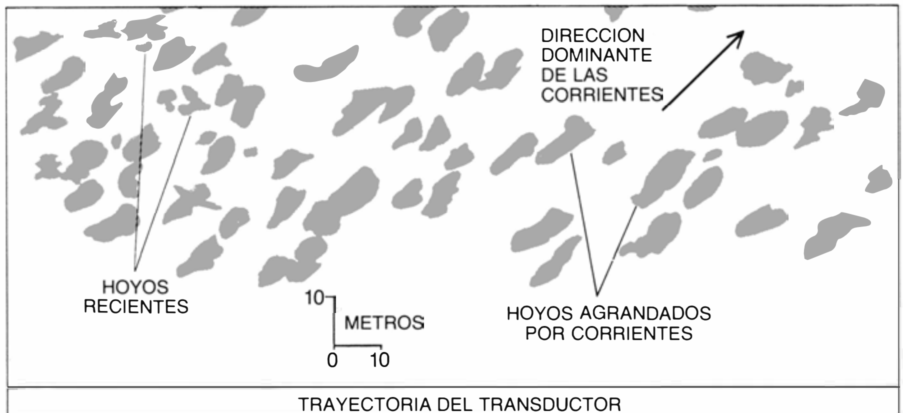
que transforman la arena en una especie de tapete de gran consistencia, capaz de resistir la erosión por las corrientes.

En los márgenes septentrional y occidental de la cuenca predomina una mezcla más grosera de arena y grava, depositada por los glaciares; al este, en el estrecho de Norton, priva el fango, mezcla de limo (más fino que la arena) y arcilla (que lo es más aún que el limo). En ese brazo de mar, el fango alcanza varios metros de espesor, debido, sobre todo, a que el sedimento descargado por el río Yukon tiende a acumularse en ese punto. En un hallazgo cuya importancia se valoraría posteriormente, cuando supimos que las morsas excavaban los surcos observados en el suelo marino, Nelson y sus colaboradores comprobaron que las almejas, uno de los alimentos predilectos de la morsa, dominaban buena parte de las extensiones de grava y fango que circundan la cuenca de Chirikov.

Convencidos, a comienzos de la década de 1980, de que la cuenca de Chirikov constituía un importante territorio de alimentación de la ballena gris, nos dispusimos a confirmar que los hoyos y surcos de las primeras sonografías de Nelson coincidían precisamente con las zonas habitadas por anfípodos, donde se habían avistado ballenas alimentándose. Además, había que medir las perturbaciones, para determinar si tenían algo que ver con la alimentación animal. De comprobarse que, en efecto, las ballenas excavaban el fondo marino, calcularíamos la cantidad de alimento que esa zona rendía al año. Asimismo, confiábamos en determinar el efecto de las actividades alimentarias de esos animales sobre la composición del sedimento y la red alimentaria del sector nororiental del mar de Bering.

Comenzamos por cartografiar la localización exacta de todos los hoyos y surcos de supuesto origen animal. A tal fin, sometimos a un examen sistemático los sonogramas obtenidos por Nelson, así como los de otros investigadores; datos que cubrían unos 4500 kilómetros de suelo marino. Los primeros registros de Nelson se habían trazado con ondas sonoras de 100 kilohertz (100.000 ciclos por segundo), muy adecuadas para identificar rasgos geológicos conocidos, de gran escala, pero cuya distorsión y baja resolución hacían difícil definir el tamaño y la forma de otras perturbaciones menores, todavía ignoradas. (Los hoyos de





4. SONOGRAMA y mapa de los hoyos excavados por las ballenas en sus incursiones alimentarias. Muestran dos tipos de estructuras hallados en el fondo de la cuenca de Chirikov: los hoyos recién formados, aproximadamente del mismo tamaño que la boca de la ballena gris, y los hoyos mayores, manifiestamente agrandados por las corrientes de fondo. La influencia de las corrientes se refleja en la orientación de los hoyos agrandados; coincide ésta con la dirección del flujo de la corriente dominante (*flecha*). Este sonograma se obtuvo con un equipo de 105 kilohertz, que convierte las señales sonoras de retorno en impulsos electrónicos digitales, a fin de que un ordenador dispuesto a bordo, conectado al registrador, elimine luego parte de la distorsión rutinaria que aparece en muchas imágenes sonográficas.

ballena recién abiertos, de escasa hondura, figuran entre las menores estructuras que puede detectar el equipo de 100 kilohertz.)

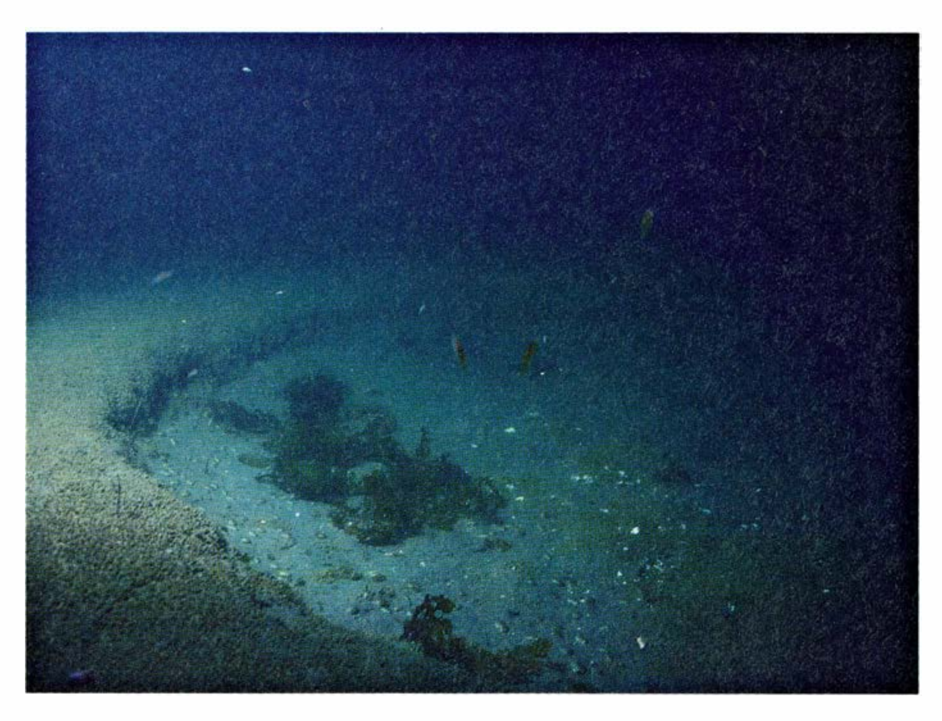
Nelson y sus colaboradores habían trazado también, con un sonar digital de lambda lateral de 105 kilohertz, sonogramas que abarcaban la cuenca entera de Chirikov. En ese sistema las señales sonoras de retorno se envían a un ordenador que corrige la distorsión. Los sonogramas resultantes reflejan la forma y tamaño reales de los perfiles del suelo marino con más exactitud que los sonogramas no digitales. También brindaron su ayuda Mary K. Nerini, de los Laboratorios Nacionales de Mamíferos Marinos, de Seattle, y Denis H. Thomson, de LGL Ecological Research Associates Inc.; éstos venían estudiando, por su cuenta, el comportamiento alimentario de la ballena gris. A petición nuestra, emplearon un sonar de barrido lateral que generaba ondas sonoras de 500 kilohertz y obtuvieron sonogramas de alta resolución de pequeñas áreas seleccionadas.

La correlación de los datos de barrido lateral con las observaciones directas de los buzos que trabajaban con Nerini y Thomson permitió, por fin, identificar la localización de los hoyos y surcos y, por añadidura, su forma, tamaño y origen probable. Los hoyos, ovalados, se concentraban en un área de 22.000 kilómetros cuadrados, sobre todo en el centro de la cuenca de Chirikov y al sur de la cercana isla de San Lorenzo. En la propia cuenca, los hoyos, poco profundos, afectaban al 18 por ciento del suelo; medían entre 1 y 10 metros de largo, de 0,5 a 7 metros de ancho y de 0,1 a 0,4 metros de profundidad. No sabíamos de ningún proceso geológico que pudiera excavar semejantes oquedades en la cuenca. Más al este, en el estrecho de Norton, el metano resultante de la descomposición de materia orgánica enterrada formaba cráteres circulares, pero la arena de la cuenca de Chirikov era demasiado permeable para que se formaran en ella.

La distribución de los hoyos ovalados se correspondía con la adoptada por las ballenas mientras se alimentaban, observada durante los reconocimientos aéreos. Se correspondían también con la extensión de la capa de arena y sus anfípodos en la cuenca de Chirikov. Ciertamente, los hoyos parecían ser obra de las ballenas.

Pero había que confirmarlo. Medimos más de 1000 hoyos y comparamos su tamaño con el de la boca del animal. Se disponía de datos sobre 240 ballenas grises; la longitud media de la hendidura, o longitud de un lado de la boca cerrada, era de 2,1 metros. Por término medio, los hoyos medían 2,5 metros de largo, 1,5 metros de ancho y 10 centímetros de profundidad: los abriría fácilmente una ballena manteniendo la boca paralela al fondo marino y aspirando el sedimento. En ocasiones, los hoyos aparecían agrupados, como si los animales excavaran unos cuantos antes de emerger en busca de aire.

Además de los hoyos de 2,5 metros de longitud, descubrimos otros muchos de mayor tamaño, en promedio de



5. HOYO recién excavado en el fondo del mar por una ballena gris. Mide alrededor de 2,5 metros de largo, 1,5 metros de ancho y 10 centímetros de hondo. Para capturar presas bentónicas, la ballena se inclina y succiona sedimento por un lado de la boca. Acto seguido, separa las presas filtrando el sedimento a través de las "ballenas": una serie de láminas fibrosas que cuelgan de su mandíbula superior. Por lo general, los animales que sobrepasan los cuatro milímetros quedan atrapados en la boca, mientras que muchos animales más pequeños se devuelven al agua. Larry Martin, de LGL Ecological Research Associates, tomó la imagen.

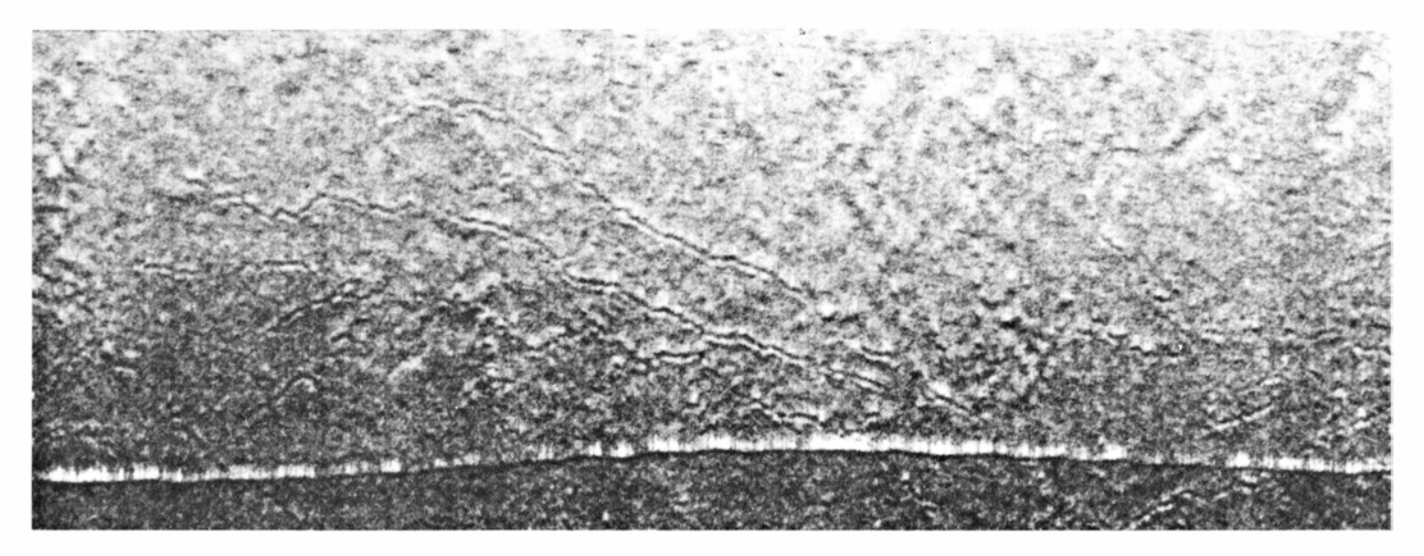


6. MANTO DE GALERIAS TUBULARES, forradas de mucosidad, construido por anfípodos ampelíscidos: crustáceos parecidos a quisquillas, bentónicos, que constituyen la presa preferida de las ballenas grises. La red de tubos que segregan endurece el sedimento suelto, formando un manto capaz de resistir la erosión que ejercen las fuertes corrientes de la zona. Al alimentarse, las ballenas destruyen trozos de manto, dejando tras de sí hoyos temporalmente vulnerables a la erosión. Las reducidas proporciones de los anfípodos juveniles les permite escapar a menudo a través de las "ballenas". Esa especie se desarrolla bien en los hábitats perturbados, y así los animales "perdonados" reconstruyen el manto. Cediendo las formas juveniles, las ballenas resiembran el fondo del mar y preparan una nueva cosecha de anfípodos para la temporada siguiente.

ocho metros de largo por cuatro de ancho. Podrían cavarlos los cetáceos si acompañaran la succión de sedimento con un movimiento de avance, o si se alimentaran en los márgenes de oquedades antiguas. Puede también que las corrientes –en particular las fuertes corrientes de fondo asociadas con las tormentas de otoño– agrandaran los hoyos, o grupos de éstos recién formados. Según nuestros datos de barrido lateral, las aberturas grandes tendían a presentar la misma orientación que las corrientes de fondo dominantes en la zona. Al ingerir los anfípodos y el manto circundante de tubos, las ballenas dejarían al descubierto arena suelta, que las corrientes erosionarían con más facilidad que el tapete de los crustáceos (más adelante, los anfípodos colonizarían esa arena y recrearían el tapete, que estabilizaría los hoyos).

El otro rasgo que destacaba en el relieve marino eran los surcos, estrechos, largos y sinuosos; aparecían en su mayoría en un área de 6600 kilómetros cuadrados en torno a los márgenes de la cuenca de Chirikov y en los estrechos circundantes, donde suelen registrarse corrientes de fondo rápidas y las arenas son bastante gruesas. Los surcos alcanzaban, en promedio, 47 metros de longitud y 0,4 metros de anchura, aunque los había de hasta 150 metros de largo. A primera vista, esos canales podrían confundirse con las estrías producidas por el roce contra el fondo de las carenas del hielo marino. Sin embargo, las estrías glaciales suelen aparecer en plataformas más someras (rara vez de más de 20 metros de profundidad), suelen ser más anchas (superan el metro de ancho) y más regulares y se disponen en series paralelas.

Ningún dato permitía atribuir a las ballenas la autoría de esos regueros estrechos. Por el contrario, las observaciones de los biólogos indicaban que a las morsas les resultaría fácil labrarlos. En 1972, Samuel W. Stoker, de la Universidad de Alaska, había avistado los surcos desde un submarino. Como viera morsas alimentándose en las cercanías, pensó que podía tratarse de huellas de su actividad alimentaria. Unos 10 años después, mientras le dábamos vueltas al posible origen de los surcos, John S. Oliver, de los Moss Landing Marine Laboratories, demostró que cerca de esos regueros abundaban conchas de almeja con toda la apariencia de haber sido desenterradas y vaciadas en fecha reciente. Ambas observaciones venían a confirmar la hi-



7. SURCOS excavados por las morsas en su búsqueda de almejas u otras presas enterradas. Se distinguen fácilmente en los sonogramas. A diferencia de las estrías labradas por las carenas de hielo que rozan los suelos marinos, los surcos de las morsas son estrechos y sinuosos. Las estrías glaciales tienden a ser más amplias, más rectas y más angulares. Al parecer, las morsas excavan surcos con el hocico; en promedio, esos canalículos miden unos 47 metros de largo por 0,4 metros de ancho. Se supone que, cuando el animal busca alimento, mantiene la cabeza baja y el hocico en el sedimento. Probablemente desentierra las almejas escupiendo un chorro de agua por la boca. Luego succiona el cuerpo de la almeja y arroja la concha vacía al lado del surco. (Imagen cedida por William K. Sacco.)

pótesis de los esquimales, según la cual las morsas se alimentan en el fondo, pues en su estómago, además de almejas, encuentran arena y grava.

Nos percatamos, además, de que los surcos solían aparecer en almejares, y que su anchura se acomodaba a la del hocico de la morsa. Este postrer descubrimiento concordaba con la indicación de Oliver en el sentido de que las morsas no desentierran almejas con los colmillos, como se había supuesto, sino que nadan con la cabeza baja, pegada al fondo, buscando presas o detectándolas con las vibrisas –proyecciones a modo de bigotes que les cubren el hocico. Desentierran las almejas con los labios, o con agua que lanzan en chorro por la boca, tras lo cual las agarran con los labios y sorben la carne. Se calcula que una morsa adulta consume hasta 85 kilogramos de alimento al día.

Determinado ya el emplazamiento y el tamaño de los hoyos de ballena y los surcos de morsa identificados en los sonogramas, aprovechamos una ocasión única para medir la cantidad de alimento obtenido por los grandes mamíferos marinos en una zona de forraje. Sin duda, al sónar de barrido lateral le habrían pasado por alto muchos surcos de morsa, lo que impedía determinar la cantidad de alimento que consumen aquellos animales. (El sónar no detecta, por ejemplo, los surcos superficiales orientados en dirección perpendicular a la seguida por el transductor.) Sin embargo, sí calculamos la cantidad de alimento que las ballenas recolectan anualmente en la cuenca de Chirikov.

De acuerdo con nuestros cálculos, los hoyos recientes (de una temporada de alimentación) y no agrandados (de dos a cuatro metros de longitud) removían el 5,6 por ciento de los 22.000 kilómetros cuadrados del área de alimentación de las ballenas, es decir, unos 1200 kilómetros cuadrados. Se trata de una estimación a la baja, puesto que ignora los hoyos recientes de mayor tamaño, excavados por ballenas en su movimiento o que se alimentan en los márgenes de los hoyos.

Aceptando los cálculos de los biólogos, según los cuales la zona aloja 171.000 kilogramos de presas por kilómetro cuadrado, tasamos en unos 205 millones de kilogramos (171.000 kilogramos multiplicado por 1200 kilómetros cuadrados) el peso total de las presas consumidas. No quedaba ya más que determinar los requerimientos alimentarios de la población. La población de ballenas grises de 16.000 individuos necesita, aproximadamente, 1100 kilogramos de alimento por individuo y día durante una temporada cifrada en 180 días (unos 3168 millones de kilogramos). Por consiguiente, se concluyó que la cuenca de Chirikov proveía un mínimo del 6,5 por ciento de las necesidades de los animales; el máximo podría llegar al 15 por ciento. La región de la cuenca de Chirikov, que representaba sólo el 2 por ciento del territorio septentrional de alimentación de la ballena gris, constituía, pues, una región especialmente valiosa para el cetáceo.

Los datos de barrido lateral también nos permitieron estimar la cantidad de sedimento resuspendido por las ballenas y valorar las repercusiones de esa perturbación sobre la ecología del mar de Bering. Si la extensión perturbada era de 1200 kilómetros cuadrados (1200 millones de metros cuadrados) y el hoyo promedio de 10 centímetros (0,1 metros) de profundidad, la alimentación de las ballenas resuspendía, cuando menos, 120 millones de metros cúbicos (172 millones de toneladas métricas) de sedimento por año. Lo que viene a triplicar, aproximadamente, el sedimento en suspensión que el río Yukon descarga cada año en el sector nororiental del mar de Bering.

El río Yukon aporta fango a ese mar, mientras que la actividad de las ballenas extrae el que se acumula en la cuenca de Chirikov. Una vez arrojado el sedimento a la columna de agua, las partículas más pesadas tienden a precipitar de nuevo, pero las corrientes del norte arrastran la arcilla y el limo fino hacia el mar de Chukchi. Esa separación de los componentes del sedimento impide que el fango cubra el antiguo manto de arena de la cuenca, y de ese modo la zona conserva unas cualidades idóneas para los anfípodos.

La separación del fango de la arena es sólo uno de los efectos manifiestamente beneficiosos de los hábitos alimentarios de la ballena. Además de "limpiarles" la arena de la cuenca de Chirikov a los anfípodos, las ballenas grises se aseguran, sin proponérselo, una abundante provisión de alimento para la siguiente temporada. A la vez que capturan los anfípodos adultos, de-

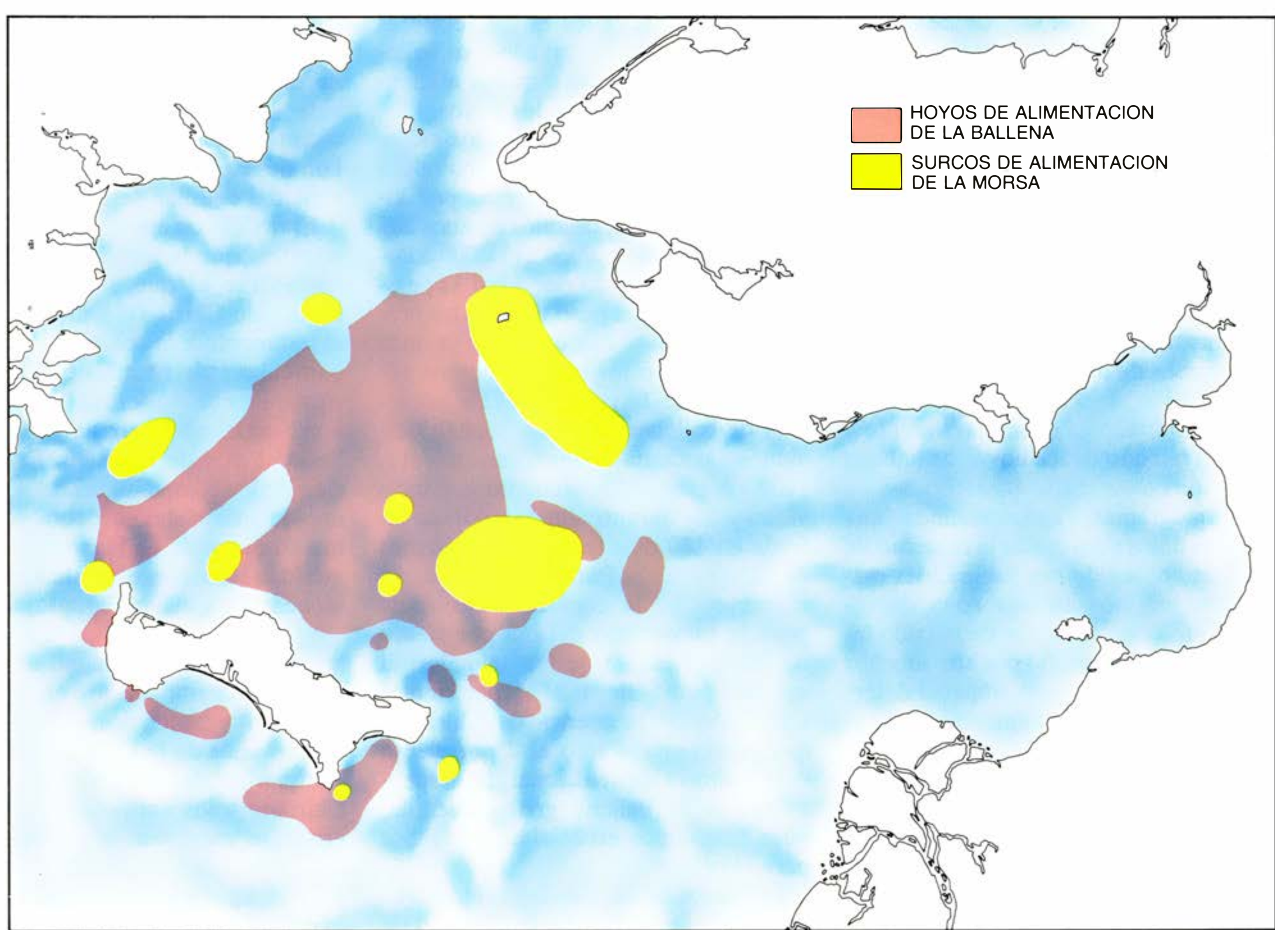
ALMEJAS

ANFIPODOS

CAPA DE ARENA DE GRANO FINO

GRAVA Y ARENA GRUESA

MANTO DE FANGO PROCEDENTE DEL YUKON



vuelven los juveniles al agua junto con el sedimento; y así, a imagen del agricultor que esparce las semillas por el campo recién arado, las ballenas "siembran" de anfípodos juveniles el suelo marino. El anfípodo es una especie pionera: se desarrolla bien en un hábitat perturbado y reconstruye rápidamente el tapete de tubos.

Las ballenas estimulan también la regeneración del cultivo de anfípodos: liberan al agua nutrientes que permanecían enterrados en el sedimento e incrementan la provisión alimenticia de los crustáceos. Igual que el sol, los nutrientes favorecen el crecimiento del plancton –el principal recurso alimentario de los anfípodos recién "sembrados". Al año siguiente, para cuando arriben los cetáceos el tapete de tubos se habrá reconstruido y dará comienzo un nuevo ciclo.

Aunque no pudimos medir con pareja precisión la cantidad de sedimento removido anualmente por las morsas, sí efectuamos una estimación aproximada. Contando con que las 200.000 morsas de la región pasan unos 100 días en el mar de Bering nororiental, y que cada animal excava al menos dos surcos de tamaño medio por día, las morsas removerían anualmente unos 75 millones de metros cúbicos de sedimento (100 millones de toneladas métricas).

A diferencia de la fracción de grano fino del sedimento removido por las ballenas, el de las morsas probablemente no viaje muy lejos. Cuando se suspende arena y grava en el agua tienden a precipitar de inmediato, sálvandose del arrastre de la corriente. Por otra parte, el sedimento perturbado por las ballenas se resuspende a considerable distancia del fondo, a veces incluso en la superficie; en el caso de las morsas, lo habitual es que el sedimento removido se arroje a los costados del surco recién abierto. Comparados con los hábitos alimentarios de la ballena, los de la morsa parecen influir menos profundamente en el sedimento y, por consiguiente, en el reciclaje de los nutrientes.

8. MAPAS que identifican diversas características del mar de Bering nororiental. Ayudan a demostrar que los hoyos y los surcos detectados en los sonogramas del fondo fueron obra de ballenas y morsas. El mapa que muestra los diferentes tipos de sedimento del mar de Bering nororiental y la fauna asociada con ellos (*arriba*) señala que la arena de grano fino cubre buena parte de la cuenca de Chirikov y está dominada por el alimento favorito de las ballenas: los anfípodos. Los hoyos atribuidos a las ballenas grises (*abajo*) se concentran en la misma área. En los márgenes de la cuenca predomina una mezcla de grava y arena rica en almejas: uno de los alimentos favoritos de la morsa. Los regueros atribuidos a las morsas (*abajo*) se localizan a menudo en los márgenes de la cuenca. Las morsas pueden alimentarse en áreas muy fangosas, pero los autores no han encontrado surcos en ellas. (Figura de Andrew Tomko.)

No sólo no daña el equilibrio de la vida en el mar de Bering nororiental, sino que la profunda perturbación del suelo marino provocada por la actividad alimentaria de los mamíferos desempeña, al parecer, una función importante en el ecosistema. Pero ciertas actividades humanas podrían alterar ese equilibrio y amenazar la supervivencia de las ballenas. Si se extrajera grava o arena del mar de Bering, los antiguos sedimentos donde habitan los anfípodos –de los que dependen las ballenas– podrían destruirse para siempre. La capa de arena que cubre el fondo marino es muy delgada y los procesos geológicos actuales no la remplazarían; sólo podría hacerlo otro período glacial. También resultaría peligroso cualquier derrame de petróleo: los anfípodos parecen extraordinariamente sensibles a la contaminación por petróleo.

En el pasado remoto, los fenómenos naturales han atentado repetidamente contra las ballenas y las morsas, recortando sus zonas de alimentación. Diríase que los animales son capaces de adaptarse a esos cambios. Durante el Pleistoceno, que comenzó hace 2 millones de años y se prolongó hasta hace 10.000 años escasos, los ciclos de glaciación y fusión produjeron cambios drásticos en el nivel del mar. Las ballenas grises y las morsas del Pacífico probablemente desarrollaron su estrategia de alimentación en el fondo marino –insólita y de gran éxito–, cuando la fusión de los glaciares inundó la amplia plataforma que une Alaska con Siberia, formándose un mar somero que mantenía abundante vida marina. Durante los períodos de glaciación, el nivel del mar descendía y la plataforma se convertía en un terreno bajo, lo cual obligaba a los cetáceos a buscarse el sustento en un territorio más restringido.

Prueba tangible de su aptitud ecológica es que las ballenas y las morsas han sobrevivido a los repetidos períodos glaciales y se han recuperado notablemente de la intensa caza que las amenazó gravemente hace unos 50 años. La capacidad de los mamíferos para depredar animales que no son sus almejas y anfípodos predilectos, y de "labrar" el fondo marino en épocas de abundancia, parece haberles sido muy útil.

Rendimiento de la mujer casada en la investigación

Aunque las mujeres publican menos que los hombres, no cabe atribuir ese resultado dispar al matrimonio o las obligaciones familiares. Más aún, las mujeres casadas y con hijos publican tanto como sus colegas solteras

Jonathan R. Cole y Harriet Zuckerman

De los estudios sobre los resultados logrados por los científicos en el ámbito de la investigación, juzgados en razón de la cantidad de trabajos editados, se desprende que las mujeres suelen publicar, a lo largo de toda su carrera, menos que los hombres de edades, instituciones superiores y campos de actividad equiparables. Se han propuesto varias explicaciones para esta disparidad productora, desde la presencia de una discriminación sistemática asociada al género hasta la existencia de diferencias biológicas, no demostrada, en lo concerniente a la aptitud científica.

Por doquier se oye decir que el matrimonio y el cuidado de los hijos representan una carga muchísimo mayor para las mujeres que para los hombres y que en esa realidad social reside la principal explicación de las diferencias de género en el ámbito de las publicaciones científicas. Al margen de que esto sea o no cierto, la creencia en ese supuesto influye en las posibilidades de promoción de las mujeres, en sus decisiones y en el trato que reciben.

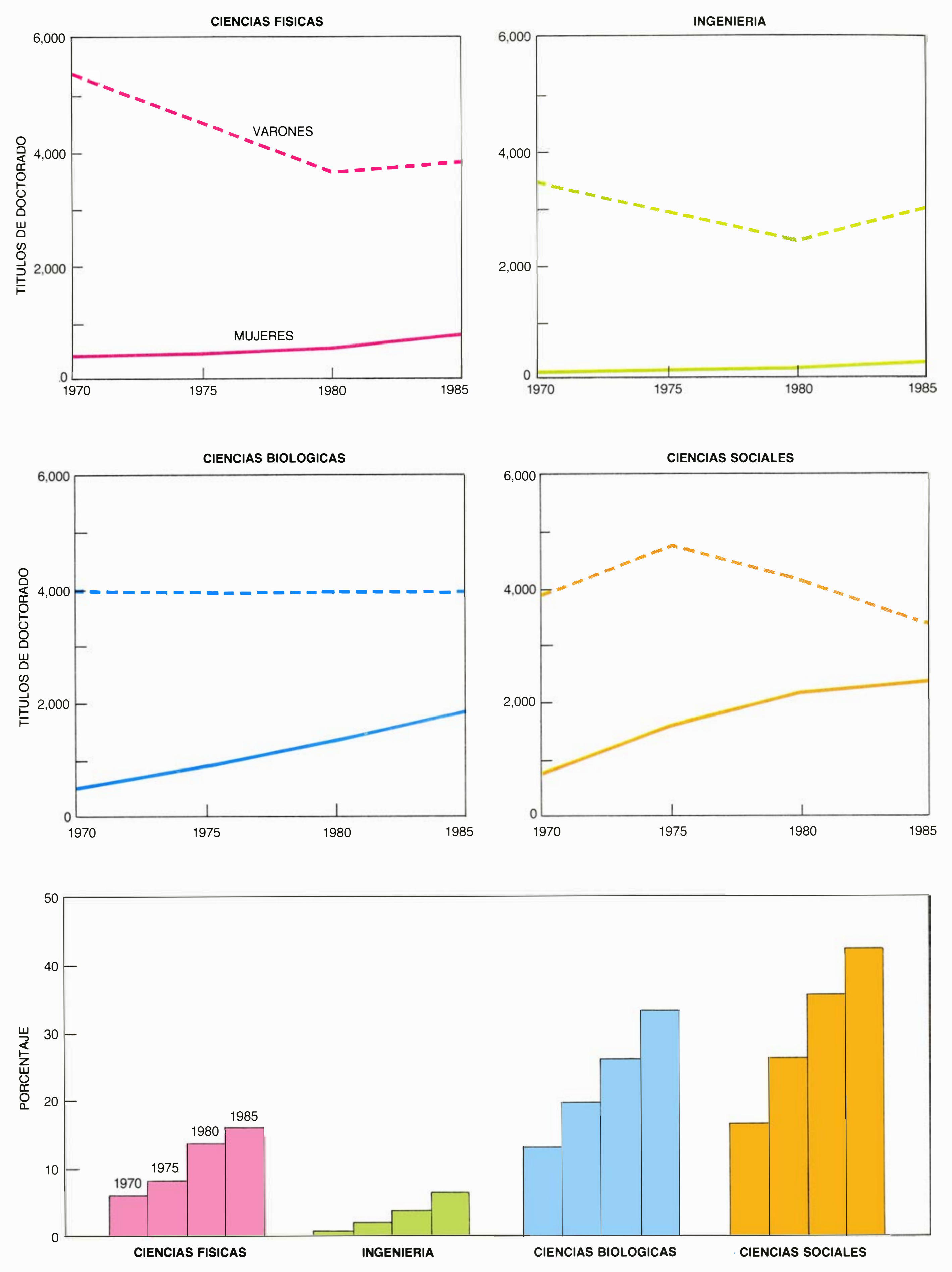
Por nuestra parte, decidimos verificar (en el marco de una investigación más amplia sobre la profesión científica, de ellos y ellas, en los Estados Unidos) la tesis opuesta, avanzada ya en estudios anteriores: ni el matrimonio ni la maternidad influyen en absoluto en los resultados logrados por las mujeres en el campo de la investigación. Para ello, examinamos la relación dinámica entre la vida familiar y el trabajo de investigación de las mujeres a lo largo de su carrera académica, un enfoque no adoptado por anteriores investigaciones, que se limitaban a establecer una correlación entre el número de trabajos publicados y la situación marital y parental presente. Nuestro estudio se fundamenta en una serie de entrevistas a 120 profesionales: 73 mujeres y 47 varones. Queríamos averiguar si los científicos (varones y mujeres) consideran incompatibles, en términos generales, el matrimonio y la maternidad/paternidad con una carrera científica, si así había ocurrido en su caso concreto y qué efectos cuantificables (medidos por el número de publicaciones) habían tenido realmente el matrimonio y la maternidad sobre los resultados logrados por la mujer en el ámbito de la investigación. Habida cuenta de que los varones no han sido, tradicionalmente, los principales responsables de la atención de la prole, centramos nuestro análisis, casi exclusivamente, en las mujeres. Comparamos los índices de publicación de las casadas y las solteras, de las madres y las mujeres sin hijos.

Evidentemente, el número de publicaciones constituye un indicador imperfecto de las aportaciones de un profesional. Sin embargo, se observa una alta correlación entre éste y otros parámetros más idóneos, como la valoración de sus colegas. Asimismo, el número de publicaciones es de gran trascendencia para su carrera profesional. Esto nos llevó a adoptar la cantidad de trabajos publicados como un valor aproximado y válido de los resultados obtenidos en el ámbito de la investigación. Reconocemos que la mujer científica es, en cierto sentido, una "superviviente". Por definición ha superado la dureza de la formación universitaria, ha conseguido un doctorado y trabaja como profesional de la ciencia. No intentamos examinar el impacto de las expectativas culturales sobre las posibilidades de que una mujer logre salir airosa de este proceso; para ello habría sido preciso investigar los mecanismos de criba de las mujeres en las carreras científicas.

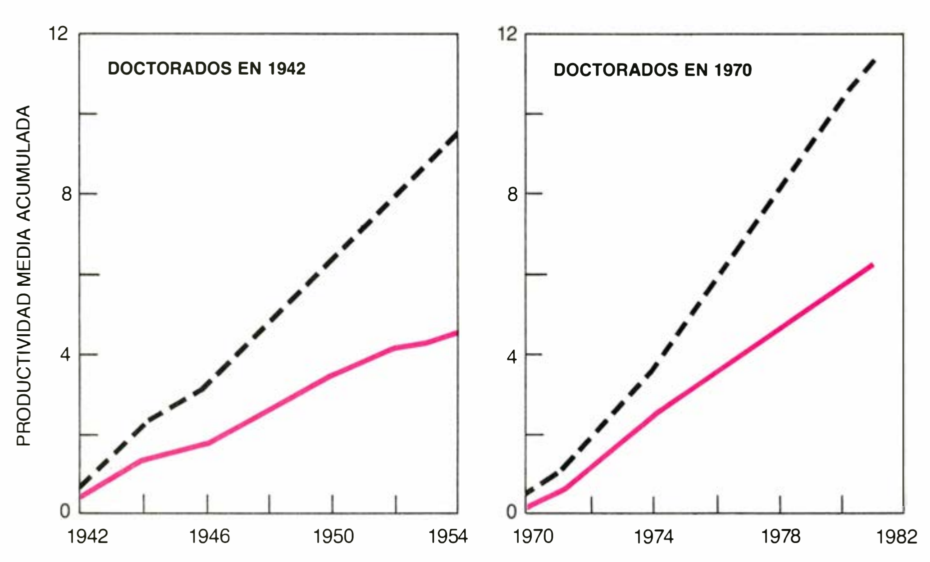
Seleccionamos los sujetos del estudio a través de un procedimiento estratificado en el que se tuvieron en cuenta el género, la edad profesional, el campo de especialización y el estatuto científico. Con el propósito de comparar la incidencia del matrimonio y la maternidad en mujeres que se licenciaron en períodos históricos distintos, dividimos el universo estudiado en tres grupos de edad: las que se doctoraron entre 1920 y 1959, antes de la aparición del movimiento feminista, y las doctoradas en las décadas de 1960-69 y de 1970-79, cuando se puso en marcha y se propagó dicho movimiento. Un 80 por ciento procedía del campo de la matemática y las ciencias físicas y biológicas y el resto de la economía y la psicología: la misma relación de 4 a 1 se aplicó a cada grupo de edad.

También dividimos cada grupo de acuerdo con el reconocimiento alcanzado, entre sus pares, en relación a otras personas de aproximadamente la misma edad profesional. El nivel superior de científicas (las que designamos como "eminentes") del grupo de más edad comprendía a miembros de la Academia Nacional de Ciencias (*National Academy of Sciences*), de la Academia Norteamericana de Artes y Ciencias (*American Academy of Arts and Sciences*) o catedráticas de departamentos clasificados entre los diez más destacados en cada campo en las encuestas nacionales sobre la calidad de los programas de doctorado. En el grupo de edad intermedio clasificamos como eminentes a las *Guggenheim fellows* o a las que ocupaban una plaza en propiedad en uno de los diez departamentos más renombrados. Se consideraron eminentes las científicas más jóvenes que habían recibido becas Guggenheim o eran ayudantes o profesoras asociadas en uno de los diez departamentos más prestigiosos.

Bajo el epígrafe de "corrientes" se



1. NUMERO DE TITULOS DE DOCTORADO concedidos a mujeres: ha aumentado desde 1970, pese al descenso general de los otorgados a los varones. Las curvas (*arriba*) representan el número de doctorados concedidos anualmente en los Estados Unidos entre 1970 y 1985. El porcentaje correspondiente a las mujeres ha experimentado un sensible incremento, pero sigue siendo bajo en física e ingeniería. (Datos procedentes del *National Research Council*.)



2. LOS VARONES publican más trabajos (*negro*) que las mujeres (*color*). Esta disparidad se amplía con el tiempo. De los datos obtenidos a partir de extensas muestras de doctores, expuestos en anteriores estudios, parece desprenderse que dicha divergencia se ha reducido un poco en relación a la década de 1940.

alojaba a las científicas que no cumplían estos estrictos requisitos; las seleccionamos al azar entre las listas de personal docente y de laboratorio de los colegios universitarios y universidades acreditados, situados en las mismas regiones geográficas que los centros de las "eminentes". También se buscó la equivalencia con estas últimas en cuanto a edad profesional y especialización. Aunque esta selección se efectuó de forma sistemática, dados los criterios aplicados, el pequeño número de sujetos y la exclusión de algunos grupos importantes (como las profesionales empleadas en laboratorios industriales), en ningún caso puede la muestra obtenida considerarse una auténtica muestra al azar de todas las científicas estadounidenses.

Interrogamos a nuestros sujetos sobre su historial investigador y número de publicaciones. Solicitamos sus comentarios a propósito de unos gráficos elaborados por nosotros, en los que establecíamos una correlación entre la cifra de trabajos publicados cada año y algunos sucesos importantes de su carrera y su vida personal.

Varones y mujeres dijeron, por igual, haber topado con la convicción de que no era posible combinar el matrimonio y la maternidad con las exigencias de una carrera científica. No es de extrañar que el grupo de científicos de mayor edad hubiesen escuchado más a menudo esta opinión. Antes (e incluso poco después) de la Segunda Guerra Mundial, la opinión generalizada situaba el matrimonio y la maternidad en primer lugar y la ciencia en segundo término dentro del orden de prioridades aceptado para las mujeres; afirmábase que un trabajo serio en ese dominio exigía una absoluta dedicación. La idea de que las mujeres pudiesen ser a la vez esposas y madres tradicionales y científicas productivas resultaba claramente absurda.

Una zoóloga recordaba así tal estado de opinión: "Si una tenía hijos y un marido que trabajaba, la psicología no admitía que pudiera dedicar más que una atención secundaria a su trabajo." Muchos científicos de la época, varones y mujeres, compartían esa convicción. Sostenían que la mayoría de éstas no podrían continuar dedicándose seriamente al trabajo científico una vez casadas. Una distinguida bióloga, con más de setenta años, declaró que la jefa de su laboratorio se indignó cuando su protegida le anunció su intención de contraer matrimonio: "Me echó del laboratorio en cuanto se enteró de que iba a casarme; para ella eso era una traición contra las mujeres." Según un químico, en aquella época una investigadora soltera estaba "acabada" cuando cambiaba de estado; y un físico declaró que: "En cuanto las mujeres se incorporaban a la vida doméstica, su carrera tocaba a su fin en todos los casos."

Como consecuencia de este clima de opinión, las mujeres decididas a dedicarse a la investigación no solían casarse. En palabras de una bióloga que ya pasa de los setenta años: "el matrimonio no se consideraba adecuado [para las mujeres científicas]. La ciencia exige dedicación. Una se emboza un sudario, no lleva ropas normales... no debe casarse; no debe tener hijos".

Evidentemente, no todas las mujeres científicas compartían ese criterio y algunas se casaron, tuvieron hijos y continuaron trabajando. Pero el número de científicas fue reducido, al menos hasta finales de la Segunda Guerra Mundial; y el número de las casadas, entre éstas, no llegaba a la mitad. Las mujeres casadas con hijos eran casos rarísimos en el mapa de la ciencia en los Estados Unidos. Y las pocas que había eran acusadas de infringir las normas familiares vigentes.

Aunque la actitud social en relación a los papeles de esposa y madre ha experimentado un cambio significativo, incluso las más jóvenes entre las científicas declararon que para muchas personas el matrimonio y la maternidad seguían siendo incompatibles con una carrera académica. Una joven química declaró: "Cuando me quedé encinta, perdí todo derecho a ser considerada una científica seria... a los ojos de muchísimas personas." Si quienes ocupan posiciones de poder y autoridad se guían por estos prejuicios en sus actuaciones, las mujeres casadas ven severamente restringidas sus oportunidades y sus posibilidades de medrar.

Para valorar el impacto real del matrimonio y la maternidad sobre las mujeres que trabajan en el dominio de la ciencia, teníamos que encontrar la respuesta a cuatro preguntas: ¿son las mujeres casadas, entendidas como grupo, menos productivas en el campo de la investigación que las mujeres solteras? Entre las mujeres casadas, ¿publican menos trabajos las que tienen hijos que las que no los tienen? ¿Se observa una disminución de los trabajos de investigación publicados por las mujeres después del alumbramiento? ¿Influye el número de hijos de una mujer científica sobre los resultados alcanzados en el ámbito de la investigación?

Los historiales de publicaciones y la carrera profesional de las "eminentes" ofrecieron los primeros indicios de que, en general, el matrimonio y los hijos no afectan a la producción científica. Por término medio, las eminentes casadas (y la probabilidad de casarse y tener hijos es igual entre las "eminentes" que entre sus colegas "corrientes") publican un poco más —y no menos— que las mujeres eminentes solteras a lo largo de su carrera: un promedio de 3,0 trabajos al año, frente a 2,2 para las segundas. Entre las eminentes casadas, las que tienen hijos publican una media de 2,9 trabajos al año y las que no los tienen, 3,3. Más aún, durante los tres años anteriores y posteriores al nacimiento de su primer hijo, el rendimiento de estas mujeres, en número de publicaciones anuales, no desciende, sino que de hecho aumenta, de 1,5 a 2,7 trabajos. Finalmente, el índice de publicaciones de estas científicas no

guarda relación alguna con su número de hijos.

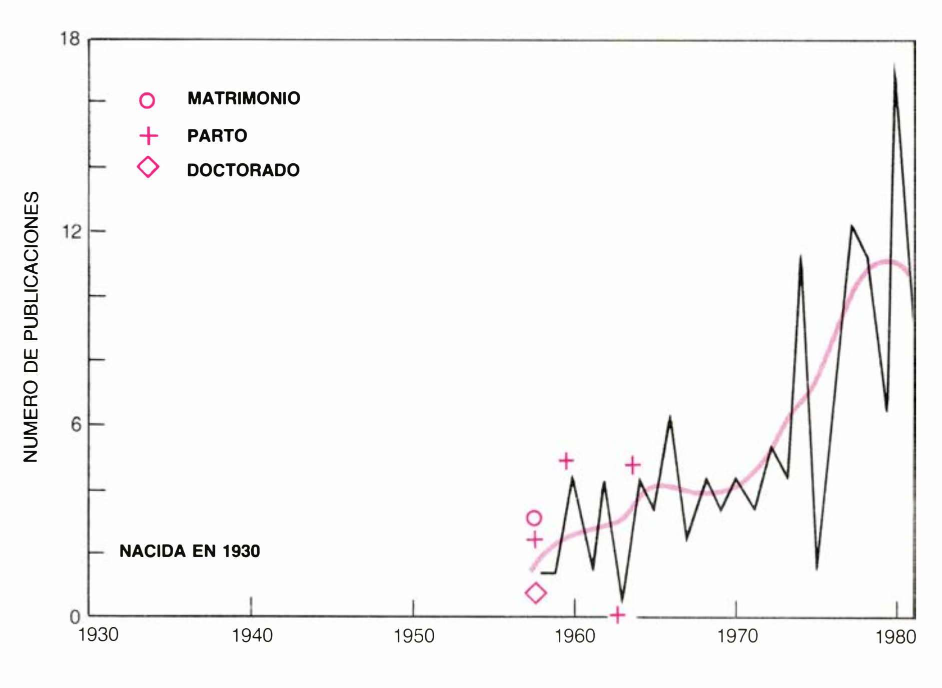
Estos resultados estadísticos, que contradicen rotundamente los prejuicios del sentir común, concuerdan no obstante con los hallazgos de anteriores estudios sobre muestras representativas del conjunto de la población. ¿Qué correspondencia guardan con las descripciones subjetivas de las mujeres entrevistadas? ¿Piensan éstas que no existe realmente ninguna relación entre el matrimonio y el hecho de tener hijos, por un lado, con la cantidad de trabajos de investigación publicados, por otro, y, en caso afirmativo, cómo se explica esta opinión?

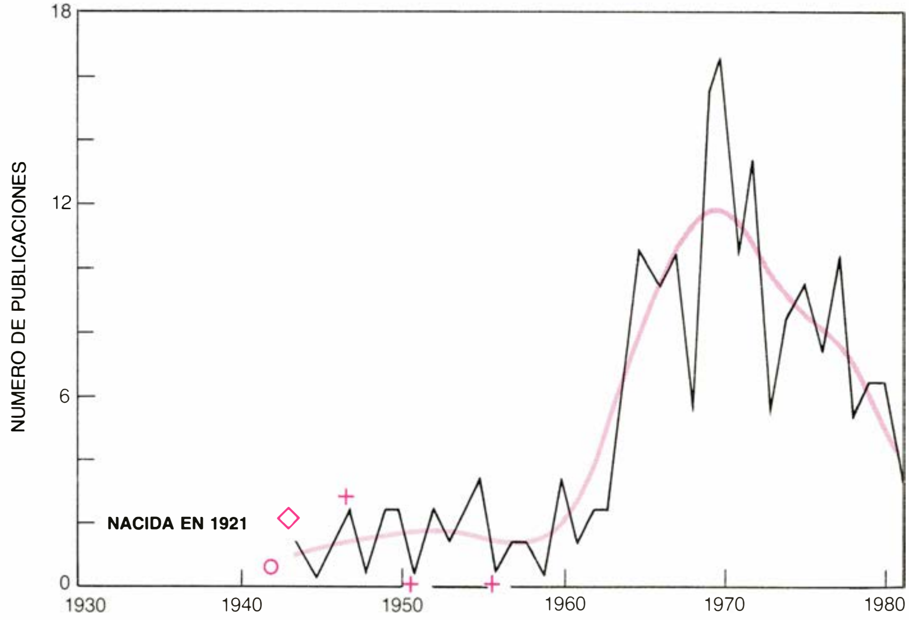
Los historiales de publicaciones de dos científicas eminentes del grupo de más edad, una con cuatro hijos y la otra con tres, sirven de ejemplo de una pauta generalizada [*véase la figura 3*]. En general, las científicas en estas circunstancias publicaron menos en su juventud y cuando sus hijos eran pequeños; se observa una clara tendencia creciente en el número de trabajos publicados a partir de la primera década de su carrera. También se aprecian fluctuaciones anuales —altos y bajos— en el marco de esta tendencia general creciente. Desde luego, todas estas mujeres reconocen que los hijos ocupan mucho tiempo. "Exigen una clara dedicación de tiempo. Lo que significa que una lo pierde para otras cosas..." Pero no para la investigación; ésta continúa.

¿Cómo es posible que prosiga? Estas mujeres eminentes subrayan, ante todo, el hecho de que se sigue pensando sobre temas científicos en casa y no sólo en el trabajo. La reflexión científica no concluye en el momento de cerrar las puertas del laboratorio. "Cuando los críos eran pequeños... se me ocurrían ideas mientras lavaba los platos y cuando daba el pecho al bebé. Realicé mis mejores trabajos, desde el punto de vista científico, durante los meses de gestación." En segundo lugar, si están casadas con otro científico (y éste es el caso típico), estas mujeres hablan de su trabajo de investigación durante las "llamadas horas libres". En tercer lugar, las obligaciones profesionales de los jóvenes, al margen de la investigación, son mucho más restringidas que las de los colegas de más edad. "Dedicaba más tiempo a la ciencia entonces que ahora... Mi tiempo estaba ocupado [entonces] por mi trabajo y mis hijos. Ahora, hay tantas otras cosas..." En cuarto lugar, unos índices de publicación más bajos durante los primeros años no deben atribuirse necesariamente a las obligaciones que impone la maternidad, sino que son una característica de la fase inicial de un programa de investigación. Como comentaba cierta física: "Los primeros años... estábamos construyendo esos enormes aparatos. La teorización y la experimentación nos ocupaban mucho tiempo y no escribíamos demasiado." Otra, al comentar los altibajos de su propia gráfica de publicaciones, señaló: "Estás muy atareada en los 'valles'."

Según estas científicas eminentes, el matrimonio y la maternidad no redujeron su productividad en lo que al número de publicaciones se refiere. ¿Podemos dar crédito a sus explicaciones retrospectivas? Quizá su visión de la situación no se ajuste a la realidad. Al fin y al cabo, un examen de las gráficas de las "eminentes" casadas con hijos de más edad indica que su productividad científica fue menor en su juventud y cuando sus hijos eran pequeños. ¿El hecho de tener hijos de corta edad influyó en su índice de publicaciones, al menos a corto plazo?

Pensamos que las pautas de publicación de dos grupos de científicos que no deberían verse afectados por el matrimonio o la maternidad/paternidad —las mujeres eminentes solteras y los hombres eminentes cuyas esposas se hacían cargo del cuidado de los hijos—



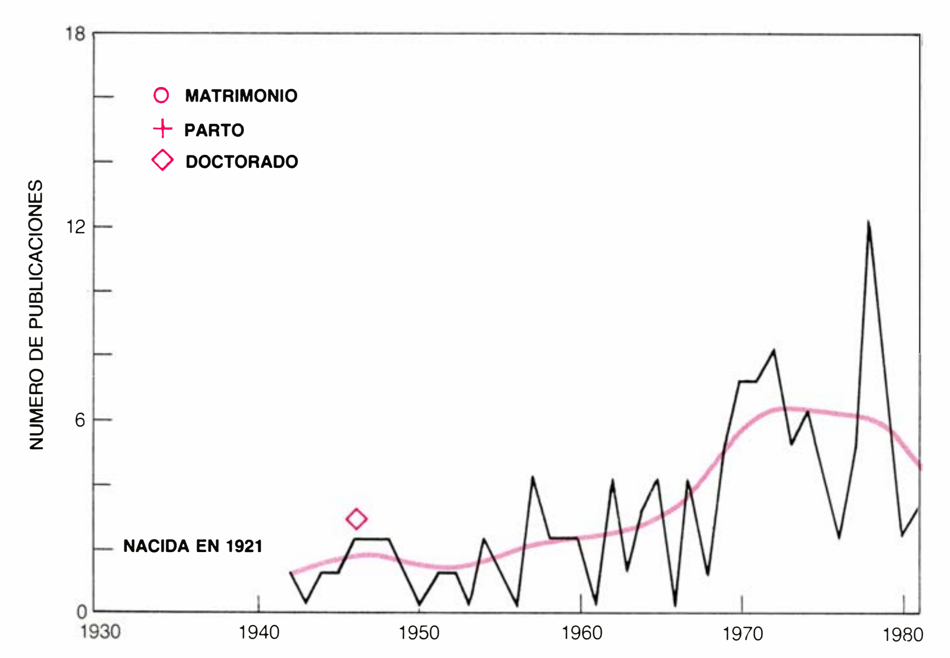


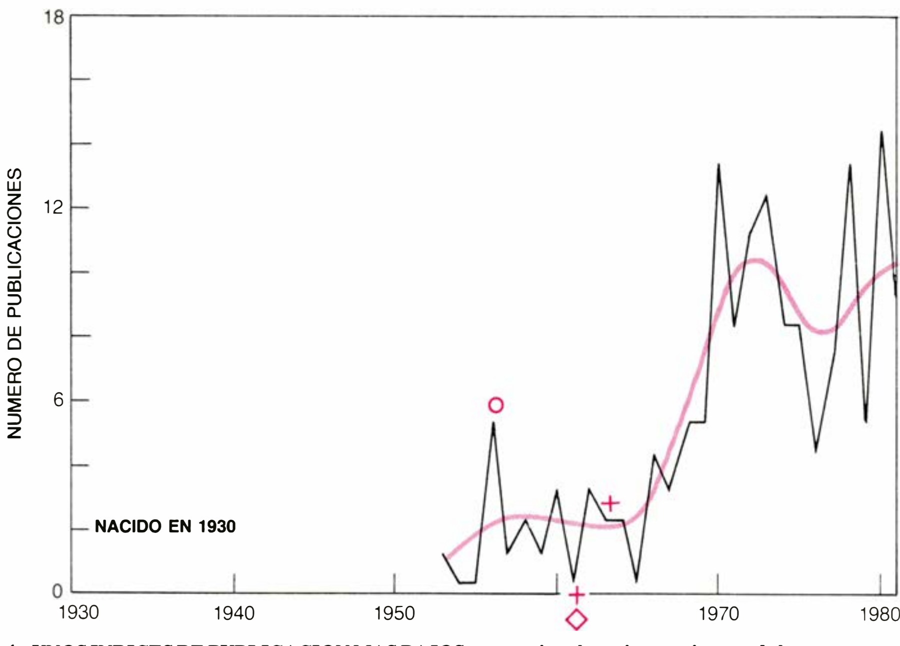
3. CIENTIFICAS "EMINENTES": evidencian una tendencia ascendente en el número de trabajos publicados anualmente durante las tres primeras décadas de su carrera. Los historiales de publicaciones de dos mujeres casadas, una con cuatro hijos (*arriba*) y la otra con tres (*abajo*) siguen esta pauta; no se aprecia ninguna repercusión negativa del matrimonio o de la maternidad. La curva negra dentada indica el número de trabajos publicados; se ha calculado la curva suave (*color*) para reflejar la tendencia general.

podrían ayudarnos a aclarar estos primeros resultados contrarios al sentir común. ¿Publican los científicos presumiblemente libres de obligaciones más que las mujeres con hijos pequeños en los primeros años de su carrera? La respuesta parece ser que no [*véase la figura 4*]. La probabilidad de que el nivel de publicaciones sea bajo durante la primera década de su profesión académica es la misma para las mujeres solteras que para los varones casados. Y también muestran la misma incidencia de oscilaciones y de una tendencia general creciente a lo largo del tiempo. El hecho de que las pautas de publicación de estos dos grupos en los primeros añõs no difieran mucho de las de las mujeres casadas con hijos confiere credibilidad a los comentarios de estas últimas.

Pero se plantea otro interrogante. Las mujeres eminentes de más edad afirman que el matrimonio y el hecho de tener hijos no menguaron su rendimiento. ¿Cómo se explica, entonces, que sus índices de publicación muestren un aumento a medida que quedan atrás los años de dedicación a los hijos, sobre todo si se consideran las distracciones y responsabilidades adicionales que, según dicen, llevan aparejadas la madurez profesional y un mayor reconocimiento? Parte de la respuesta reside en las oportunidades de investigar en colaboración, que aumentan con la promoción profesional. Los principiantes realizan ellos mismos todo o casi todo el trabajo de laboratorio; los científicos establecidos ocupan a menudo importantes puestos administrativos y supervisan el trabajo que se desarrolla en sus laboratorios. Su índice de publicaciones refleja el consiguiente incremento de los trabajos de equipo.

Es de señalar que la pauta de publicaciones de algunas científicas eminentes no presenta la típica tendencia creciente a lo largo del tiempo [*véase la figura 5*]. También estas mujeres expresan la opinión de que el matrimonio y la maternidad influyeron poco en su rendimiento científico.





4. UNOS INDICES DE PUBLICACION MAS BAJOS caracterizan los primeros tiempos de la carrera profesional de los varones casados y también de las mujeres solteras. La curva de publicaciones de una bióloga destacada que nunca se casó (*gráfica superior*) exhibe la misma pauta oscilatoria con una tendencia general ascendente que las gráficas de las mujeres que se casaron y tuvieron descendencia. Idéntica pauta académica se aprecia en la gráfica de un químico eminente (*ilustración inferioro*). Su ritmo de publicaciones fue mucho más lento mientras sus hijos eran pequeños, a pesar de que sus responsabilidades domésticas eran mínimas.

Nuestros datos parecen indicar, por tanto, que las mujeres eminentes de más edad con hijos publicaron en general un número de trabajos equivalente al de sus colegas solteras al principio de sus carreras. ¿Podríamos haber cometido tal vez un error crítico al recoger e interpretar nuestros datos? ¿Cabía la posibilidad de que las mujeres que tienen hijos y continúan produciendo en el campo científico sean un grupo "selecto", esto es, que simplemente se trate de científicas de más talento que las que optan por no tener hijos?

Aunque no es posible establecer comparaciones rigurosas en términos de capacidad científica, sí podemos comparar los índices de publicación de las investigadoras eminentes de más edad que tuvieron y que no tuvieron hijos, concentrándonos en los años anteriores a la maternidad. Para ello, establecimos dos grupos con fechas de nacimiento aproximadamente equivalentes. Comparamos los índices de publicaciones de las mujeres con hijos durante los tres años anteriores al nacimiento de su primer hijo con los "años equivalentes" en la vida de las mujeres sin hijos. El historial de los primeros años resultó ser parecido: aproximadamente 1,3 trabajos publicados al año en el caso de las mujeres que después tuvieron hijos y 1,6 en el caso de las que no los tuvieron. En otras palabras, las mujeres eminentes de más edad que con el tiempo tuvieron hijos publicaron una proporción irrelevantemente menor de trabajos al principio de su carrera, comparadas con las eminentes que nunca tuvieron hijos.

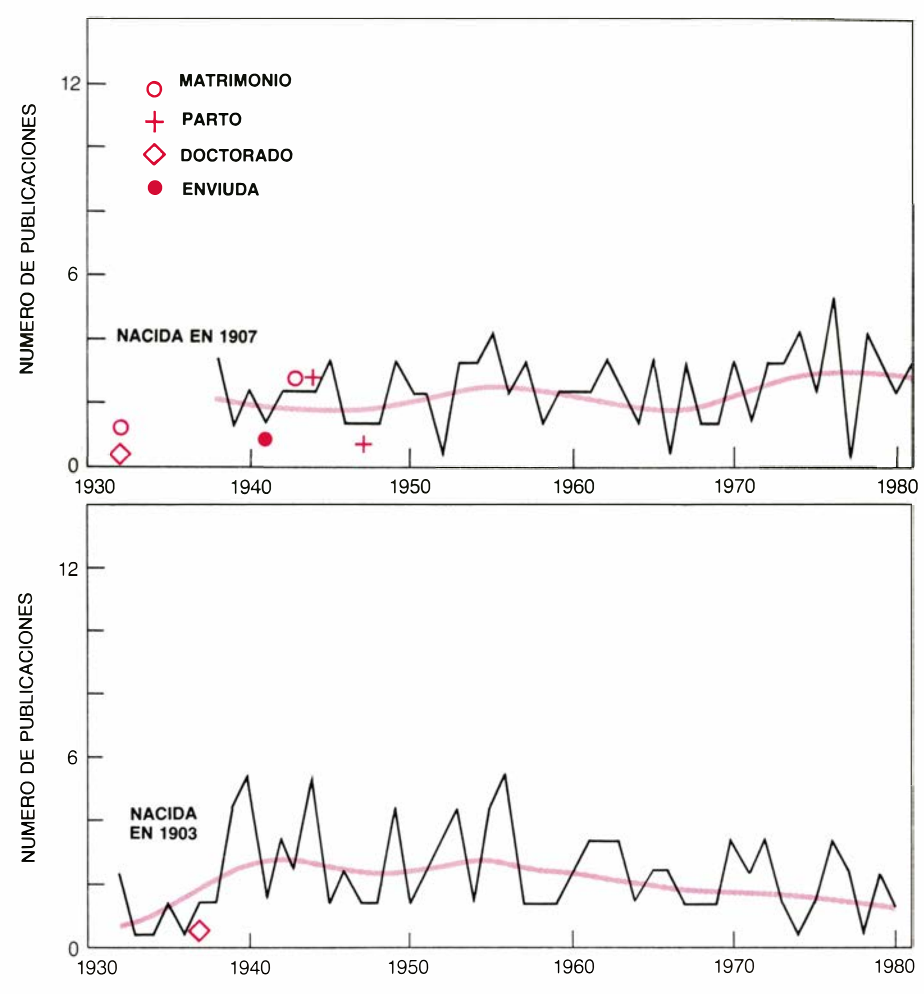
Más importante era averiguar si no habríamos cometido un error al concentrarnos en los historiales de las cien-

tíficas eminentes, en vez de fijarnos en las mujeres cuyos índices de publicación era más probable que se viesen afectados por las experiencias del matrimonio y la maternidad. Después de todo, las mujeres eminentes son científicas con mucho éxito en su trabajo; si el matrimonio y la maternidad les hubiese afectado, no habrían conseguido seguramente el reconocimiento de que gozaban. En lo relativo a los historiales de publicación de las restantes científicas, ¿reflejan, las que designamos como "corrientes", un impacto negativo del matrimonio y el cuidado de los hijos?

No hay que insistir en que los científicos "corrientes", varones y mujeres, publican en general menos que sus colegas eminentes. Entre las profesionales "corrientes" de nuestra muestra, las casadas habían publicado de hecho ligeramente menos que las solteras (un promedio de 1,1, frente a 1,7, trabajos al año). Sin embargo, las casadas con hijos no habían publicado menos que las mujeres casadas sin hijos; el promedio para ambos grupos venía a ser de un trabajo al año. Al igual que en el caso de las mujeres eminentes, sus índices de publicación no habían disminuido después de nacer los hijos. Las mujeres "corrientes" presentaban un promedio muy inferior a un trabajo al año (0,2) durante los tres años anteriores al nacimiento de su primer hijo y de un poco menos de un trabajo por año (0,8) durante los tres años posteriores al parto.

De los testimonios directos de estas investigadoras se desprende la misma impresión: el hecho de tener hijos no influyó significativamente en su historial académico. Como señalaba una psicóloga conductista relativamente poco productiva: "No se me pasó por la cabeza dejar de trabajar cuando tuve una hija... De hecho, justo después de nacer ella escribí un artículo y comencé a trabajar en el siguiente... de modo que mi trabajo... más bien pareció mejorar (es decir, rendía más, aunque bajo mayores presiones)."

Su testimonio concuerda con los de otras mujeres, como el de una bioquímica que afirmó que las obligaciones familiares no afectaron su índice de publicaciones. "Es sólo una coincidencia... la cinética de mi actuación como madre y de mi actuación como investigadora no guardan una relación directa... No ha habido interferencias entre una y otra." Es decir: en contra de las expectativas, estas mujeres no manifiestan mayor tendencia que las eminentes de más edad a atribuir su índice



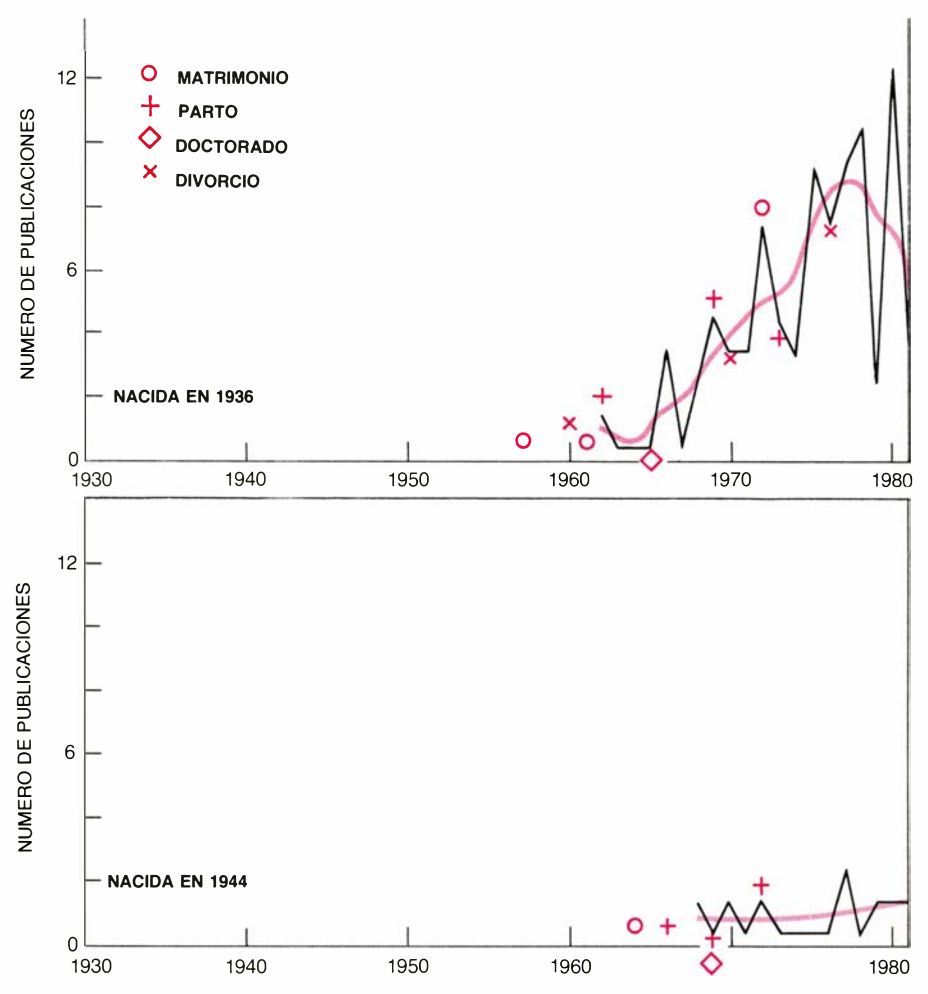
5. ALGUNAS CIENTIFICAS mantienen un ritmo de publicaciones bastante constante a lo largo de su carrera. Estas dos gráficas corresponden a dos mujeres eminentes (de reconocida valía internacional) una que se casó dos veces y tuvo dos hijos (*arriba*) y otra que permaneció soltera (*abajo*). Pese a las fluctuaciones en el número anual de publicaciones, en su caso la cifra media para intervalos de cinco años se mantiene bastante constante. Esta pauta se repite con la misma frecuencia entre las mujeres casadas y entre las solteras.

de publicaciones a la influencia del matrimonio y las responsabilidades familiares, y los datos estadísticos con que contamos corroboran su opinión.

¿Encontraríamos una evolución análoga entre las mujeres más jóvenes? En la medida en que el matrimonio y la maternidad suelen darse en los primeros años de la carrera de una mujer, los historiales de las investigadoras más jóvenes deberían reflejar su impacto sobre la productividad en términos de trabajos publicados, al menos a corto plazo.

Cierta conductista, profesora titular hoy en un departamento prestigioso y que acababa de tener un hijo, dio a entender que la maternidad no guardaba relación alguna con su ritmo de publicación. "Tener un hijo resulta agobiante en muchos sentidos, pero no porque haya afectado a mi trabajo, sobre todo si pienso en lo mucho que he... hecho este año. No, en realidad lo que una deja son las películas, la vida social y esas cosas... Me siento crónicamente cansada y agobiada y este año lo atribuyo al bebé, pero me doy cuenta de que no tiene nada que ver." Antes fueron "demasiados alumnos... un comité de revisión de becas, un trabajo en la redacción de una revista y ahora un crío. Es decir que siempre he tenido un bebé u otro al cual achacar las culpas".

Tal vez el caso límite sea el de una mujer que ocupa una cátedra subvencionada por una fundación en un departamento de primer orden. Se ha casado cuatro veces y se ha divorciado tres, y ha tenido cuatro hijos de tres maridos distintos. Si el matrimonio y la maternidad constituyen un freno para la carrera de una científica, este efecto debería haberse hecho notar en su caso. Sin embargo, su rendimiento, tabulado a través de trabajos publicados, aumentó a lo largo de toda su complicada historia personal. Ironía de las cosas, el mayor bache en su curva se produjo en 1979, uno de los pocos años en que no se casó, ni tuvo un hijo ni se divorció [*véase la figura 6*]. Al interrogarla sobre su pauta de publicaciones, respondió: "De pronto una está en con-



6. PRODUCTIVIDAD MEDIDA A TRAVES DE LOS TRABAJOS PUBLICADOS. El rendimiento no guarda relación directa con las obligaciones familiares, según ponen de manifiesto los historiales de publicaciones de dos mujeres con *curricula* muy distintos. Una (*arriba*) es una eminente conductista cuya productividad fue incrementándose continuamente a pesar de haberse casado cuatro veces (la última en 1982), de haberse divorciado tres y tenido cuatro hijos. La otra (*abajo*) es profesora adjunta de química y tiene tres hijos. Esta atribuye su baja productividad a limitaciones no asociadas a las obligaciones domésticas. Su historial de publicaciones es característico de muchas científicas "corrientes" (en torno al nivel medio).

diciones de dar cuenta de tres proyectos distintos y los trabajos empiezan a entrar en prensa... Los altibajos no tienen nada que ver con el resto de mi vida."

No obstante, el embarazo y el período subsiguiente afectaron transitoriamente los trabajos de investigación en el caso de tres de las 37 mujeres de nuestra muestra que habían tenido hijos. Nos comentaba una bióloga: "Yo era una de esas mujeres que dicen: 'estoy tan bien organizada que daré a luz y todo seguirá como antes'; pero no tenía idea de que las hormonas pudiesen afectar tanto a una persona." Cuando le preguntamos por qué su índice de publicaciones sólo había disminuido transitoriamente, y no demasiado, respondió: "Tuve la suerte de que entonces había otras personas en el laboratorio y ellas siguieron trabajando y produciendo... Pero mi cabeza pareció dejar de funcionar durante todo un año."

Estos datos longitudinales indican que el matrimonio y la maternidad no ejercen un influjo adverso sobre la productividad, si atendemos al número de trabajos publicados, de las mujeres de la muestra agregada. Aunque pocas personas pondrán en duda que el matrimonio y la maternidad imponen enormes responsabilidades, al parecer muchas mujeres científicas son capaces de seguir adelante con su carrera al mismo tiempo que hacen frente a sus obligaciones familiares. ¿Cómo lo consiguen? ¿Y cómo resuelven los conflictos que puedan plantearse entre su familia y su carrera?

La respuesta puede hallarse en parte en la forma en que estas científicas organizan sus "funciones", esto es, el abanico de misiones sociales que cada una desempeña (por ejemplo: profesora, directora de laboratorio, esposa, madre y ciudadana). Concentramos nuestra atención en tres aspectos de las distintas funciones, relacionados entre sí: sus dimensiones (el número de misiones desempeñadas simultáneamente), su congruencia (el grado de compatibilidad, más que de conflicto, entre las distintas obligaciones) y la sucesión temporal de la adquisición y eliminación de las obligaciones de cada función.

Un caso límite lo constituyen las mujeres que, convencidas de que el matrimonio no es compatible con el trabajo científico, optaron por no casarse, limitando así su espectro de funciones. No obstante, tres cuartas partes de las mujeres de la muestra se habían casado, en una proporción que parece ser característica para el conjunto de mujeres científicas en la actualidad. Para la mayoría de ellas, el problema fundamental, en lo relativo al matrimonio, era la elección del momento adecuado. Como manifestó una joven economista, "también sería una gran desventaja para mi carrera (casarme ahora). Cuando tenga una plaza en propiedad y esté más aposentada en una universidad, me resultará un poquito más fácil".

Dos terceras partes de las mujeres casadas tuvieron hijos. Según muchas, la programación de su nacimiento ayuda a seguir adelante con su carrera investigadora. Una famosa física pospuso el nacimiento de su primer hijo hasta nueve años después de casada, a fin de poder demostrar su valía profesional. Muchas mujeres jóvenes dijeron estar retrasando la maternidad hasta que ocuparan una plaza en propiedad. Una joven bioquímica, que dudaba de su capacidad para tener un hijo y mantener al mismo tiempo el nivel de rendimiento necesario para conseguir una plaza en propiedad, comentó: "Mi programa ideal es sacar una plaza en propiedad y después tener uno o dos hijos."

Al final, las mujeres eminentes y las corrientes acabaron teniendo aproximadamente el mismo número de hijos: un promedio de dos y en ningún caso más de cuatro. De acuerdo con nuestros datos, los índices anuales de publicaciones son casi iguales para las mujeres con un hijo y para las que tienen dos o más.

Otros aspectos del matrimonio y la maternidad, además de la elección del momento oportuno, pueden ayudar a conseguir un conjunto congruente de funciones. Casi las cuatro quintas partes de las mujeres casadas que entrevistamos tenían maridos que eran científicos (una proporción que es también característica del conjunto de mujeres científicas en general). Este emparejamiento selectivo ofrece, al parecer, una serie de consecuencias ventajosas para estas mujeres (así como para los varo-

nes); entre ellas una comprensión inmediata de sus obligaciones profesionales y estilo de vida. Una bióloga molecular comentaba que su marido difícilmente podía molestarse si llegaba tarde a casa porque "sabía que, por muy bien que lo hubiese planificado todo, los experimentos a veces se retrasan. Creo que eso me ha facilitado muchísimo las cosas". Las casadas con científicos publican, por término medio, un 40 por ciento más que las casadas con profesionales de otros campos. La diferencia en el índice de publicaciones puede tener su origen en una autoselección, en la convergencia de valores o en la flexibilidad de los horarios académicos.

Las científicas pueden también hacer compatibles las obligaciones asociadas a sus distintas funciones compartimentando sus vidas; pero, según declaran, esto no siempre es posible. De hecho, a muchas les resulta más difícil olvidarse del trabajo cuando están en casa que olvidarse de los niños mientras están trabajando. Asimismo, absolutamente todas las mujeres con hijos destacaron haber contado con algún tipo de ayuda doméstica o para el cuidado de los niños; soluciones necesarias, pero frágiles en el mejor de los casos. La enfermedad del marido, un niño o una asistenta puede dar al traste con toda la organización.

Teniendo en cuenta estas dificultades, ¿cabe la posibilidad de que los científicos, mujeres y hombres, sólo consigan llevar adelante sus investigaciones a costa de descuidar a sus cónyuges y a sus hijos? Nuestro estudio no estaba diseñado para responder a esta pregunta. Pero al menos sabemos una cosa: el índice de divorcios, tanto en las mujeres como en los hombres, no guarda relación con su productividad en términos de trabajos publicados.

Las científicas casadas con hijos pagan un precio por el mantenimiento de su productividad científica. Según sus declaraciones, se han visto obligadas a suprimir de sus vidas casi todo lo que no sea el trabajo y la familia, sobre todo mientras sus hijos eran pequeños. Como señaló una psicóloga eminente, lo primero que desaparece es "el tiempo de libre disposición. Creo que no soy capaz de trabajar eficientemente más de... 50 horas a la semana... Si no tuviera hijos, probablemente leería más novelas... o iría más al cine".

La pérdida de tiempo libre no afecta sólo a las actividades de ocio, sino que a veces acarrea también graves consecuencias para el trabajo de investigación y la carrera de las mujeres, aunque no repercuta de un modo significativo sobre su índice de publicaciones. Las científicas que mantienen unos rígidos horarios familiares declaran haber perdido la flexibilidad necesaria para quedarse hasta tarde en el laboratorio trabajando en un problema interesante; afirman no sentirse integradas en "el club" y confiesan carecer de tiempo para mantener conversaciones informales con sus colegas.

Otros investigadores han demostrado que sólo alrededor del 12 por ciento de las mujeres dejan de trabajar después de doctorarse. Sin duda, algunas de las que abandonan lo hacen a causa de los graves conflictos entre las tareas investigadoras y la maternidad. Una mujer que había renunciado a una prometedora carrera académica para ocupar un puesto administrativo declaró en una entrevista: "Sólo estaba en el laboratorio durante las horas que los niños pasaban en la escuela... Mis compañeros de trabajo eran personas realmente brillantes que iban publicando a un ritmo que a mí me resultaba imposible secundar... Era demasiado frustrante." Es decir: un pequeño subconjunto de mujeres considera imposible compaginar el trabajo científico con la maternidad y cambian su profesión para poder dedicar más tiempo a sus familias.

No obstante, nuestro estudio revela que, para la mayoría de las científicas, el trabajo y la maternidad sí son compatibles. Las científicas que se casan y tienen descendencia publican el mismo promedio de trabajos al año que las mujeres solteras. Compaginar las obligaciones simultáneas de una carrera, el matrimonio y la maternidad no es sencillo; exige organización y un elaborado abanico de adaptaciones personales.

Los resultados de este estudio no deben interpretarse en el sentido de que el matrimonio y la maternidad no influyen en la carrera académica de la mujer. Lo hacen, pero su trabajo de investigación no suele verse afectado. ¿Cómo se explica entonces la persistente disparidad en los índices de publicaciones de hombres y mujeres? ¿Por qué los hombres publican un número de trabajos a lo largo de sus carreras considerablemente superior que las mujeres con un historial equiparable? Es evidente que el matrimonio y la maternidad no explican esta diferencia. Serán necesarios nuevos estudios comparativos de las carreras de los investigadores e investigadoras para resolver este enigma.

El ordenador, instrumento musical

El ordenador crea toda clase de sonidos —algunos jamás oídos— generando una sucesión de números. En razón de su versatilidad, la síntesis digital de sonidos ha encontrado un lugar en la música

Max V. Mathews y John R. Pierce

El año pasado, el compositor y director de orquesta francés Pierre Boulez dejó estupefactos a los habituales de los conciertos al dar una gira por los Estados Unidos con un conjunto orquestal en el que intervenían un ordenador y diversos dispositivos electrónicos de modificación de sonidos. Las obras para ordenador y orquesta compuestas por Boulez promueven la integración, en la agrupación musical, de equipos electrónicos; éstos desempeñan un papel activo que deja muy atrás las funciones que habitualmente han venido desarrollando: el registro y la reproducción de música sinfónica. A pesar de que los ordenadores no forman parte todavía de la totalidad de las orquestas sinfónicas, los sintetizadores digitales de sonido sí están sirviendo ya de opción alternativa a los instrumentos tradicionales en la producción de bandas sonoras para cine y televisión y convirtiéndose rápidamente en los instrumentos favoritos de la música popular.

Tras todos estos esfuerzos y tentativas de incorporación en la música de los métodos de síntesis digital de sonidos complejos se encuentran algunos trabajos precursores que trataron del procesamiento de sonidos mediante ordenador, iniciados hace más de treinta años en los laboratorios Bell Telephone y en los que los autores del artículo tuvimos el privilegio de participar. Lo que en principio nos llevó a considerar el ordenador como instrumento de análisis y producción de sonidos fue un estudio de los factores que contribuían a mejorar la calidad de la transmisión del habla a través de la red telefónica. Pronto nos resultó evidente que la calidad del sonido no solamente tenía importancia en lo que al habla concernía, sino también en la música, y comenzamos a estudiar con ahínco la producción de sonidos musicales.

A pesar de que nuestros primeros ensayos de producción de sonidos musicales mediante ordenador fueron desalentadores, los instrumentos electrónicos y los programas de síntesis musical que han acabado evolucionando a partir de aquellos escarceos iniciales están ya lo suficientemente perfeccionados como para incidir de una manera poderosa en diversos campos relacionados con la música. Ante todo, los instrumentos han adquirido una considerable importancia comercial en la industria de grabación musical, pues permiten generar música y efectos sonoros fáciles de sincronizar con los acontecimientos y acciones que se desarrollan en una película cinematográfica o en la televisión. En segundo lugar, proporcionan un universo sonoro virtualmente ilimitado, a través del cual compositores e intérpretes pueden expresar sus ideas y sentimientos. Por último y lo que tal vez sea lo más destacable, pueden servirnos para comprender más profundamente las especiales estructuras sonoras de lo que conocemos por "música".

Reducido a su naturaleza física esencial, el sonido no es más que una fluctuación de presión en el seno del aire. Fluctuación que podemos describir ondulatoriamente, es decir, mediante una representación gráfica que exprese la variación de presión en un punto en función del tiempo. La percepción del sonido, es decir, si resultará agradable o desagradable, depende, específicamente, de la peculiar traducción de las diversas características de las fluctuaciones de presión en impulsos nerviosos en el oído y del modo en que tales impulsos nerviosos se interpreten luego, subjetivamente, por el cerebro.

Las formas de onda de aquellos sonidos en cuya percepción se detecta un tono definido ponen de manifiesto que las variaciones de la presión son casi periódicas. El tono de un sonido se corresponde directamente con la frecuencia de la repetición de tales variaciones. Por ejemplo, una variación de presión que se repita regularmente a razón de 440 veces por segundo es percibida por el músico como un tono de altura perfectamente definida: es la nota La natural, inmediatamente superior al Do central.

La inmensa mayoría de los sonidos que llegan a nosotros tienen su origen en las vibraciones inducidas en objetos comunes, de la vida ordinaria: la vibración de las cuerdas vocales cuando se exhala aire a su través, las cuerdas del violín atacadas por el arco y la colisión de dos automóviles, por nombrar sólo unos pocos. Se generan también sonidos haciendo vibrar la membrana de un altavoz con las variaciones de la corriente eléctrica que lo alimenta. De hecho, como todo melómano sabe, un buen altavoz puede emitir una excelente reproducción de un sonido dado, si se le aplica una corriente eléctrica que refleje exactamente las variaciones de presión correspondientes al sonido original.

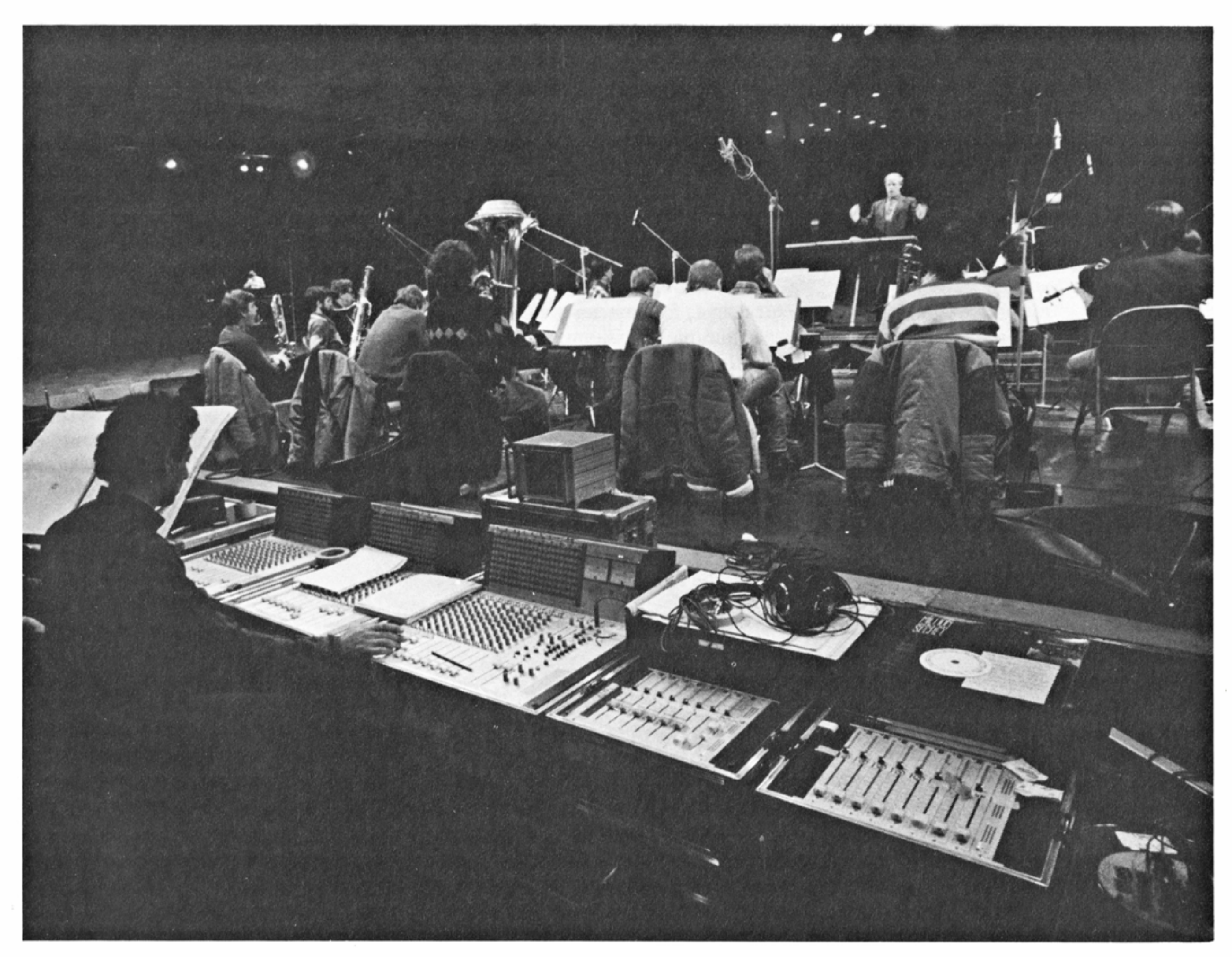
La verdad matemática conocida por "teorema de muestreo" enuncia que toda forma de onda integrada por una multitud de componentes de diversas frecuencias puede quedar cabalmente descrita mediante una sucesión de números que den el valor de la amplitud de la forma de onda a un ritmo determinado por la anchura de banda de dicha forma de onda, es decir, por la gama de frecuencias que componen la ondulación (y que solemos expresar en

hertz, o sea, ciclos por segundo). El ritmo de generación de los números ha de ser doble de la amplitud de anchura de banda. Precisamente en este teorema, demostrado en 1948 por Claude E. Shannon, de los laboratorios Bell, se fundamentan todos los procesos de registro, procesamiento y generación digital de sonidos.

Del teorema de muestreo se deduce que se puede registrar exactamente un segundo de un sonido cuya anchura de banda sea de 20.000 hertz (anchura de banda que cubre la totalidad de la gama de frecuencias perceptible por el oído humano), si durante ese segundo se recogen 40.000 números (llamados muestras) que midan, a intervalos temporalmente equidistantes, la amplitud de la forma de onda de la presión sonora (o de una tensión eléctrica directamente proporcional a ella). De manera recíproca, si pudiéramos invocar a razón de 40.000 valores por segundo los valores muestrales adecuados, sería posible producir en toda su complejidad acústica cualquier sonido concebible. El disco compacto, en el cual se encuentran codificadas y almacenadas en forma de puntos de reflectancia variable alrededor de 40.000 muestras sonoras por segundo, nos da un ejemplo de un tal sistema de almacenamiento y recuperación.

Los microprocesadores digitales —como los que encontramos en los ordenadores— consienten otro método de almacenar y recuperar las enormes cantidades de números necesarias para la génesis sonora. En un ordenador, la conversión de tensiones eléctricas en números y recíprocamente —pasos esenciales en el procesamiento digital de los sonidos— puede lograrse sin dificultad merced a unos dispositivos llamados convertidores "de analógico en digital", que traducen las señales eléctricas en sucesiones de números proporcionales al voltaje de la señal, y convertidores de "digital en analógico", encargados de realizar el proceso inverso. La sucesión de impulsos discretos de tensión eléctrica producidos por un convertidor de digital en analógico tiene que ser "alisada" y convertida mediante un filtro especial en una forma de onda continua antes de que la señal eléctrica se emita a través de un sistema de altavoces.

Por razones prácticas, tanto los ordenadores como los discos compactos expresan las muestras de amplitud mediante números binarios. En las normas al uso, la especificación de un valor muestral se hace mediante 16 bits, es decir, mediante números binarios de dieciséis dígitos. Ello permite descomponer la amplitud de la forma de onda sonora en 65.536 niveles discretos. (En la práctica, se utiliza la mitad de tales números binarios para representar muestras de amplitud positiva y, la otra



1. PROCESAMIENTO DIGITAL del sonido; desempeña un papel activo en conjunción con los instrumentistas del Ensemble InterContemporain, que aquí se les ve durante un ensayo de una composición del maestro francés Pierre Boulez titulada *Répons*. Los técnicos (*en primer plano*) controlan el procesamiento del sonido en tiempo real (es decir, instantáneamente) desde una estación, atendiendo a las indicaciones del propio Boulez (*al fondo*), quien está dirigiendo.

mitad, para las muestras de amplitud negativa.) La anterior gama de niveles de amplitud no es suficiente para lograr reproducciones de música *rock* o de conciertos sinfónicos absolutamente libres de ruido audible, pero el sonido de alta fidelidad resultante supera, con mucho, al de las grabaciones analógicas efectuadas en discos fonográficos normales o en cintas magnéticas.

Nuestros primeros intentos de aplicar el teorema de muestreo a la generación de sonidos mediante ordenador tuvieron por fruto una desagradable sorpresa: al parecer tan sólo éramos capaces de sintetizar sonidos que en nada parecían los armoniosos musicales. Aquellos primeros esfuerzos consistieron fundamentalmente en la conversión de series de números que representaban formas de onda sencillas (como ondas sinusoidales o perfiles en diente de sierra), y los sonidos así producidos tendían a ser demasiado insulsos o demasiado ásperos y "electrónicos".

No se trataba de que el ordenador con el que trabajábamos tuviese limitada su capacidad de producción de ondas sonoras (aunque sí hubo topes en lo tocante al tiempo y dinero disponibles). El problema consistía más bien en que nadie sabía qué formas de onda presentaban los sonidos que el oído percibía como hermosos y musicales. Una de las cualidades características del sonido es el timbre, o "color" del sonido. Aunque pudimos generar mediante el ordenador sonidos de tono e intensidad determinadas, resultaba difícil producir sonidos dotados de un timbre agradable.

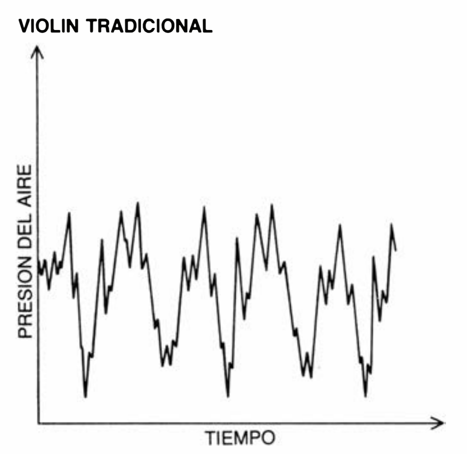
La modesta bibliografía disponible sobre la física de los sonidos producidos por los instrumentos musicales tradicionales no nos prestó mucha ayuda. Incompleta e insuficiente, en muchos casos era palmariamente errónea. Por ejemplo, aunque en la bibliografía se cargaba el acento en la descripción de los tonos musicales centrándola en sus estados estacionarios, es decir, en la porción central de sus formas de onda, pronto nos resultó evidente que mayor importancia revestían el comienzo de la ondulación (el llamado "ataque") y el final (su "extinción"). El perfil de una forma de onda, que se traza uniendo cresta con cresta y seno con seno, se denomina envolvente. Cuando la envolvente tenía un frente de ataque abrupto, seguido de una extinción de pendiente suave, el resultado era un sonido con timbre de pulsación o de percusión, con independencia de las fluctuaciones que la forma de onda mostrase dentro de su envolvente durante el estado estacionario.

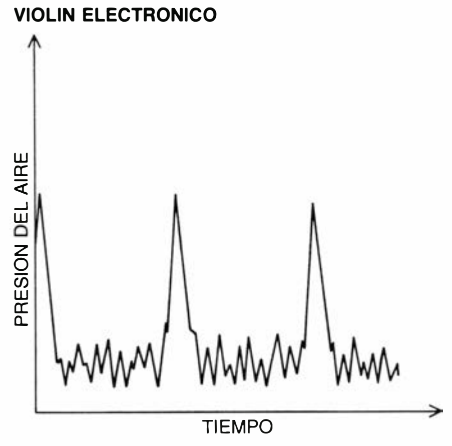
Se consideraba igualmente que el conocimiento de las amplitudes relativas de las distintas componentes de frecuencia del estado estacionario de un tono musical bastaría para caracterizar el timbre del tono. Un espectro de frecuencias de un tono musical permite ver que su forma de onda no sólo contiene una componente de frecuencia correspondiente al tono (la llamada componente de frecuencia fundamental), sino también otras varias componentes cuyas frecuencias son, por lo general, aunque no siempre, múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Estas componentes se llaman tonos parciales, o brevemente, parciales; admiten una ordenación numérica de acuerdo con sus frecuencias. Por consiguiente, la frecuencia fundamental es la primera parcial, la componente de frecuencia inmediatamente superior, la segunda parcial, y así sucesivamente.

En este sentido, según la concepción tradicional del timbre, el sonido del clarinete se encontraba totalmente determinado por un espectro de frecuencias en el que las de todas las parciales fueran múltiplos impares de la frecuencia fundamental. Aunque esta propiedad del espectro de frecuencias del clarinete es verdadera hasta cierto punto, descubrimos que no basta para caracterizar el timbre del instrumento.

Ha sido necesario mucho y muy detallado estudio para comprender los aspectos tímbricos del sonido y eliminar algunas de las anticuadas vaguedades que tanto inducen a error. Afortunadamente, el propio ordenador demostró ser un poderoso instrumento para el estudio de los timbres musicales. Tenemos una llamativa demostración de cómo analizar y sintetizar un sonido de buen timbre musical en los primeros trabajos realizados en los laboratorios Bell en 1965 por el compositor y físico francés J.-C. Risset.

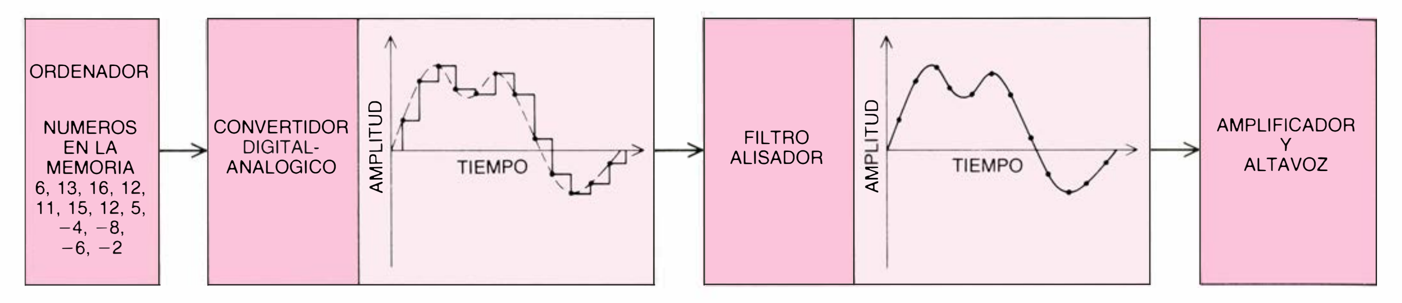
Risset se proponía sintetizar buenos tonos de instrumentos de metal basándose en lo que había podido leer en la bibliografía existente acerca de las amplitudes relativas de las parciales de la trompeta. Programó en consecuencia un ordenador para que generase números que correspondieran a las muestras de amplitud de lo que él consideró sería una forma de onda afín a la de una trompeta. Sin embargo, cuando convirtió los números en sonidos se encontró con que el sonido resultante no se parecía en nada al de una trompeta.







2. LAS FORMAS DE ONDA muestran de qué manera un sonido hace fluctuar la presión del aire ambiente. El sonido de un violín clásico (*a la izquierda*) está caracterizado por una forma de onda compleja y periódica. Un violín electrónico (*en el centro*), construido por uno de los autores (Mathews), convierte el movimiento de una cuerda metálica tensa de un arco en una señal eléctrica, que, tras ser filtrada, produce una forma simple, semejante a la de un violín. Un conocido sintetizador digital de sonido (*a la derecha*) puede remedar la ondulación seguida por un verdadero violín con mayor aproximación que el violín electrónico.



3. ENUNCIA EL TEOREMA DE MUESTREO que toda forma de onda integrada por componentes de diversas frecuencias puede descubrirse a través de una sucesión de números. En este teorema se funda todo el procesamiento digital del sonido. Los números, llamados muestras, son proporcionales a la amplitud instantánea de la forma de onda; la tasa mínima de muestreo ha de ser doble de la anchura de banda de la forma de onda (la gama de frecuencias componentes). Las muestras almacenadas en la memoria de un ordenador pueden convertirse en tensiones proporcionales a los valores de cada muestra. Seguidamente, los valores discretos de tensión eléctrica pueden ser "alisados" y convertidos en una señal continua, que, una vez amplificada, se envía a un altavoz, donde se transforma en sonido. La síntesis sonora presupone programar un ordenador para que genere la serie de números adecuada para un sonido determinado.

Procedió entonces a registrar sonidos de una auténtica trompeta y analizó su espectro con ayuda de un ordenador. Descubrió que el espectro de aquélla cambiaba mientras se iba tocando un mismo tono, y que las parciales de alta frecuencia mostraban amplitudes mucho mayores en la porción central del tono que en las porciones de ataque y de amortiguación. Sintetizando un sonido cuyas parciales de alta frecuencia fueran creciendo lentamente durante el ataque del sonido, para alcanzar sus amplitudes máximas durante el estado estacionario del tono, Risset logró sonidos que un oyente medio no distinguiría de grabaciones de tonos de una trompeta.

En breve, Risset descubrió que el espectro de frecuencias correspondiente al estado estacionario no da una descripción adecuada del timbre. Para poder sintetizar un sonido musical de un determinado timbre es preciso conocer la variación del espectro de frecuencias del sonido durante la producción de éste, es decir, de qué manera van tomando cuerpo las parciales en la fase inicial de emisión del tono y cómo se extinguen en la fase final. Risset descubrió, además, que las diferentes parciales evolucionaban de distinto modo a través del tiempo, evolución que revestía importancia crítica para el oyente. Así pues, para reproducir el sonido de los instrumentos convencionales, raras veces bastará el espectro de frecuencias conformado por una sola envolvente.

Los trabajos de Risset obedecieron a un método conocido por análisis mediante síntesis, que ha permitido avanzar mucho en la comprensión de los timbres sonoros de los sonidos de los instrumentos tradicionales. En dicho método se comienza por el análisis de un sonido (habitualmente con ayuda de un ordenador) que lo divide en componentes de frecuencia individuales; y se determina la envolvente de cada componente. Tal análisis proporciona, de ordinario, una plétora de detalles, de entre los cuales el experimentador debe seleccionar aquellos rasgos que juzgue importantes para producir el timbre característico del sonido. El investigador formula entonces una hipótesis que dé una descripción física sencilla del sonido, y somete su hipótesis a prueba, sintetizando sonidos fundándose en ella. Para la evaluación de su hipótesis se comparan los sonidos sintetizados con los originales. Si al oyente le resultasen indistinguibles, el experimentador habrá tenido éxito en hallar los aspectos de detalle característicos de una clase de sonidos.

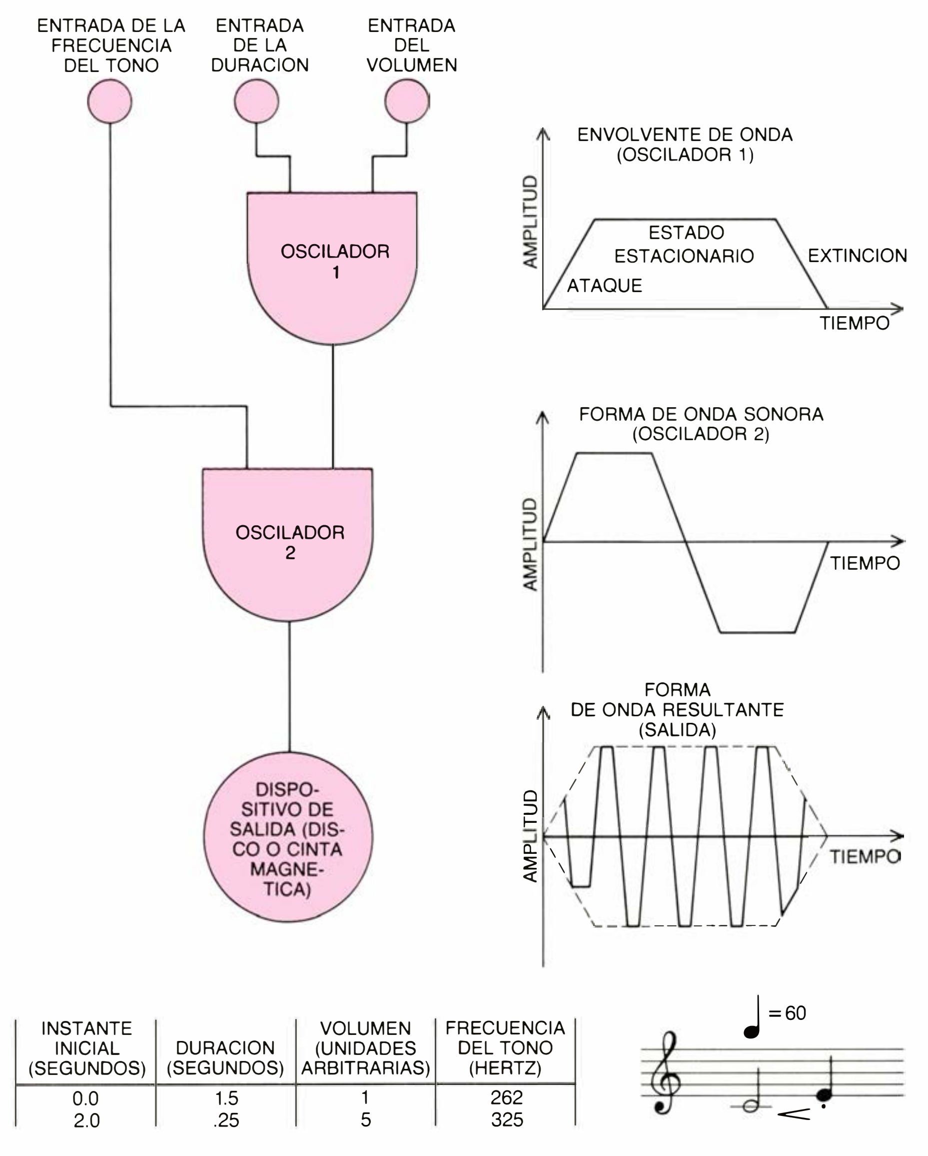
Para poder sintetizar sonidos, ya sea con fines de análisis, ya con propósito musical, es preciso disponer de programación informática capacitada para generar las series de números binarios representantes de las sucesivas muestras de una forma de onda. Aunque tales programas han de resultar de manejo sencillo, tienen que ser lo suficientemente refinados y complejos para permitir la incorporación en las formas de onda sonora de cualquier hipótesis sobre su estructura tímbrica.

A lo largo de los últimos años del decenio de 1950 y los primeros del siguiente, uno de los autores (Mathews) redactó varios programas. Uno de ellos, el Music V, contiene los elementos fundamentales de la programación que todavía encontramos en los centros de música por ordenador de todo el mundo. Cuentan con cierto número de bloques constructivos sencillos, llamados generadores unitarios, que proporcionan al músico una gran flexibilidad al construir sonidos instrumentales singulares. El programa almacena, asimismo, tablas de números para generar eficientemente determinadas formas de onda al dársele la orden de hacerlo y listas de notas (en lugar de la notación musical tradicional) para especificar qué es lo que debe tocarse.

El compositor puede crear sus propios "instrumentos", exclusivos suyos, conectando de manera peculiar los generadores unitarios. En cierto aspecto, los generadores unitarios son simulaciones informáticas de los dispositivos electrónicos utilizados en los primeros sintetizadores analógicos, que el usuario interconectaba mediante cables enchufables. Ahora bien, mientras que los dispositivos modulares de un sintetizador analógico manipulaban tensiones eléctricas, los generadores unitarios de Music V manipulan números. Los generadores unitarios principales son el oscilador, el sumador y el multiplicador.

Cada vez que se ejecuta un ciclo de oscilador, éste genera una serie de números correspondientes a una forma de onda tomada de un catálogo de formas posibles, que han sido almacenadas en la memoria del ordenador como serie de muestras. Tales formas de onda pueden adoptar múltiples perfiles: sinusoidales, cuadrados y en diente de sierra, entre otros. El tener almacenadas las formas de onda permite aumentar mucho el rendimiento de los osciladores, porque el ordenador tan sólo tiene que consultar la lista de muestras del perfil de onda, en vez de calcularlas. Además, la forma de onda almacenada determina ciertos aspectos de timbre.

Controlan el oscilador dos variables, cuyos valores ha de proporcionar el operador. Una determina la amplitud de su salida, y la otra, la frecuencia del ciclo de generación de la forma de onda. Ambas magnitudes pueden variar con el tiempo, permitiendo así as-



INSTANTE INICIAL (SEGUNDOS)	DURACION (SEGUNDOS)	VOLUMEN (UNIDADES ARBITRARIAS)	FRECUENCIA DEL TONO (HERTZ)
0.0	1.5	1	262
2.0	.25	5	325

4. UN "INSTRUMENTO" COMPUTARIZADO, construido a partir de los llamados generadores unitarios del programa de síntesis musical Music V, escrito por uno de los autores (Max V. Mathews). Los generadores unitarios son subprogramas cuyas entradas y salidas numéricas pueden interconectarse. El más importante de los generadores unitarios es el oscilador. En cada ciclo de oscilador se genera una serie de números que corresponden a una forma de onda preseleccionada. La amplitud de la forma de onda de salida y la frecuencia de los ciclos de generación de formas de onda están determinadas por las dos entradas del oscilador. La entrada de amplitud de un oscilador encargado de determinar la altura musical (el "tono") consiste muchas veces en la salida de otro oscilador que controla la envolvente sonora. La envolvente determina el "ataque" del sonido (es decir, la rapidez con que se forma), su estado estacionario (su porción central) y su extinción (rapidez o lentitud con que se desvanece). Un instrumento así construido se "toca" mediante listas de notas (*abajo, a la izquierda*), esto es, instrucciones para el ordenador que especifican la misma información que una nota del pentagrama aporta (*abajo, derecha*) al intérprete. (Esquemas realizados por Gabor Kiss.)

censos y descensos de la amplitud y la frecuencia. A menudo, los valores de amplitud que alimentan un oscilador generador de sonido provienen de otro oscilador que funciona como generador de envolvente para controlar el ataque y la extinción del sonido. Repitamos una vez más que las funciones de ataque y extinción tienen una importante influencia sobre el timbre de los sonidos generados por ordenador.

Como sus nombres sugieren, los generadores unitarios de adición y multiplicación calculan la suma y el producto de dos números que les son alimentados. El sumador puede sumar las salidas de dos osciladores sinusoidales "puestos en sintonía" para ser las parciales del instrumento. Puede también sumar al valor que especifica la frecuencia de un oscilador un número pequeño, de variación regular. Así se simula el efecto de vibrato. El multiplicador puede utilizarse de diversos modos: como control de volumen (para ello se multiplica por un coeficiente dado el valor de la amplitud con que es alimentado un oscilador) o con el papel de transposición de escala (multiplicando por un coeficiente dado el valor de frecuencia inyectado en un oscilador). Se suelen utilizar también generadores unitarios que proporcionen números aleatorios, sea para crear sonidos que simulen ruido, sea para crear pequeñas variaciones en la amplitud y altura de los tonos generados, a fin de hacerlos parecer más vivaces y menos maquinales.

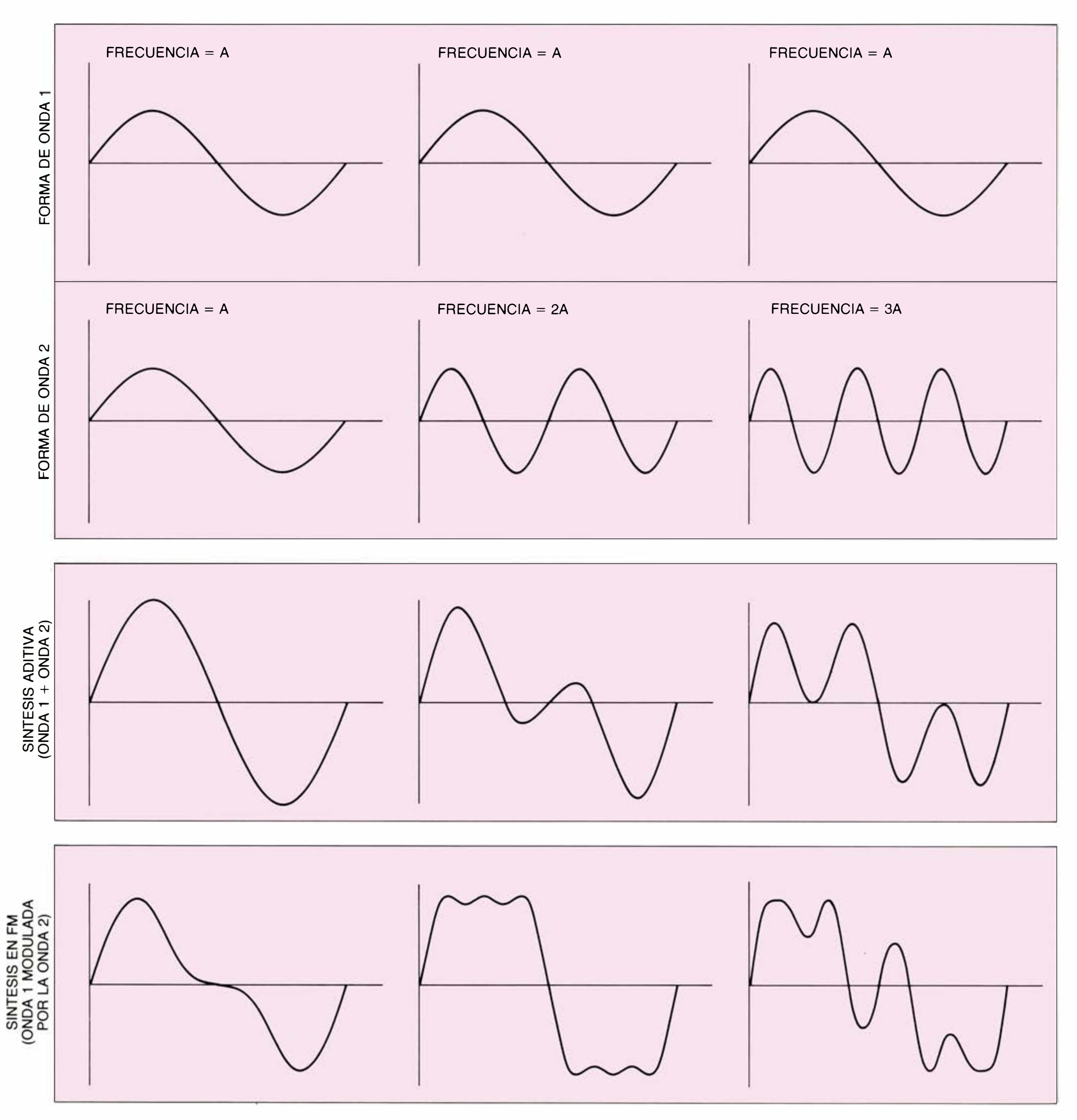
Al principio del programa Music V, el compositor crea un "instrumento" seleccionando un conjunto de generadores unitarios y especificando las interconexiones entre todas sus entradas numéricas y sus salidas. Una cuando menos de las salidas debe ir a un convertidor de digital en analógico, que traduce las muestras binarias en una forma reproducible por altavoz. El diseño de un instrumento es una de las funciones más creativas de las que dispone un compositor de música computarizada; por el contrario, el compositor que descansa en los instrumentos tradicionales para interpretar sus obras tan sólo puede esperar los sonidos tradicionales. Pero, ¿cómo "componer" una pieza musical mediante un tal programa? Se efectúa a través de listas de notas.

Se llama lista de notas a una instrucción dada al ordenador, que especifica esencialmente la misma información que le proporciona al intérprete una nota del pentagrama de una partitura musical: establece en qué momento debe tocarse la nota, su duración, con qué instrumento ha de interpretarse, su altura y su intensidad sonora. Suele incluir, además, información especial para regular el timbre del instrumento. Evidentemente, las listas de notas no tienen el aspecto de las notas en las partituras musicales; son letras y números que el ordenador interpreta como información de entrada para los "instrumentos" de producción de muestras, compuestos a su vez por generadores unitarios.

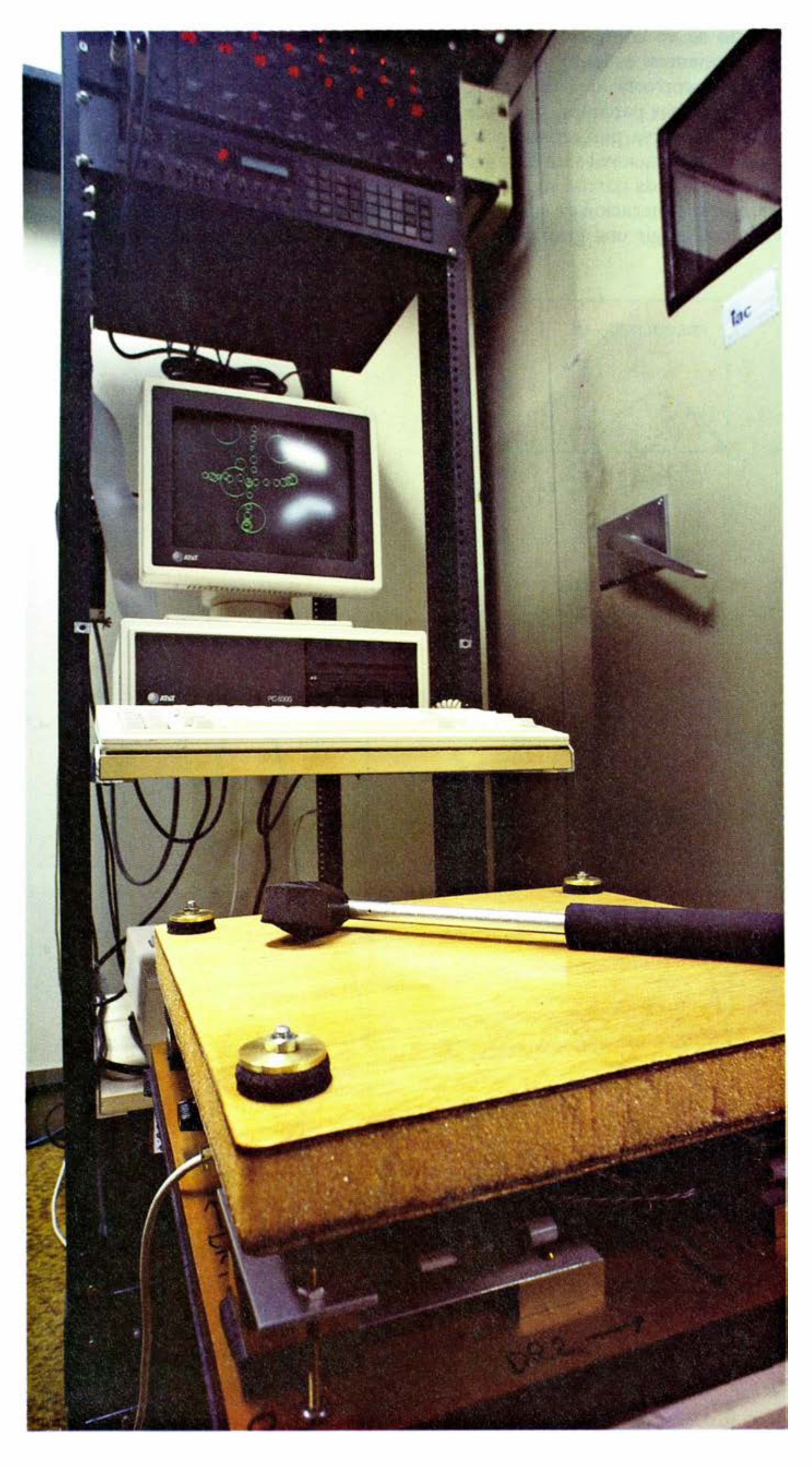
Son varias las estrategias generales a seguir para sintetizar sonidos complejos. Risset se sirvió, por ejemplo, de una técnica llamada síntesis aditiva, o de sumación de parciales. En esta técnica se sintetizan por separado las parciales individuales de un sonido dado, permitiendo a cada una tener independientemente de las demás su frecuencia y envolvente propias antes de sumarla con las otras para obtener una versión sintetizada del sonido. Así pues, mediante la síntesis aditiva podemos imi-

tar, muy de cerca, las parciales ligeramente inarmónicas (parciales cuyas frecuencias no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental) del piano o las prominentes parciales inarmónicas de campanas y tambores. La síntesis aditiva es el método más general de sintetizar timbres.

La extraordinaria potencia de este método se ve contrarrestada con dos inconvenientes: es lento y caro. La generación correcta de un timbre requiere muchas parciales, y si cada una ha de obtenerse por separado, el volumen computacional será muy grande. Además, si cada parcial sigue un curso distinto, la generación de sus envolventes puede exigir una gran cantidad de información de control. Así pues, muchos músicos han buscado atajos para engendrar timbres comparables a los generados por síntesis aditiva, pero con menores esfuerzos. Uno de los más notables es el método de modulación de frecuencia, inventado por John M. Chowning, de la Universidad de Stanford. Se trata de la misma técnica apli-



5. DOS METODOS CORRIENTES de generar formas de onda complejas son la síntesis aditiva y la síntesis por modulación de frecuencia (FM). En la síntesis aditiva se suman las formas de onda al objeto de producir una forma de onda musical. Las frecuencias de las ondulaciones sumandos son, de ordinario, múltiplos enteros de la frecuencia determinante del tono, o fundamental, y corresponden a las componentes del sonido musical cuya frecuencia sea múltiplo de la fundamental; se denominan parciales. En la síntesis FM, se varía la frecuencia de una forma de onda, llamada portadora, de acuerdo con la amplitud de otra forma de onda, llamada moduladora. Las ondulaciones resultantes tienden a revestir mayor complejidad y a producir tonalidades más ricas. Se consiguen tonos más complejos variando las amplitudes relativas y las fases de portadora y moduladora durante la producción de un tono. Dado que la síntesis por modulación de frecuencia exige menor número de formas de onda para producir tonos más ricos, esta técnica se encuentra más difundida que la síntesis aditiva.



6. INSTRUMENTO MUSICAL "INTELIGENTE" del laboratorio de Mathews: consiste en un ordenador personal conectado a un sensor fabricado a la medida y a un sintetizador digital de sonido. El instrumento permite "dirigir" una pieza musical programada: al dar golpecitos con un martillo cubierto de goma sobre el "datón" (*en primer plano*) se determina el tiempo; la localización de los golpeteos del martillo controla el equilibrio instrumental y el volumen sonoro. En la pantalla del ordenador montado en lo alto del datón se muestran una serie de golpes: el centro de cada círculo indica en qué punto fue golpeada la superficie con el datón; el radio del círculo es proporcional a la fuerza del impacto. Las dos cajas negras montadas en el bastidor por encima del datón son el sintetizador digital y un dispositivo de procesamiento digital del sonido.

cada a los populares sintetizadores digitales de nuestros días.

La modulación de frecuencia (FM) es tenida de ordinario como una técnica de radiocomunicación fundada en la transmisión de información por modulación, o variación de la frecuencia de una señal de alta frecuencia (llamada portadora) de acuerdo con una señal de información de baja frecuencia (llamada señal moduladora). La técnica de Chowning se funda en utilizar portadoras y moduladoras que tengan frecuencias idénticas o frecuencias del mismo orden de magnitud. En las transmisiones radiofónicas de FM se evitan semejantes relaciones de frecuencia entre portadora y moduladora, porque esparcirían infructuosamente la señal de información sobre una enorme anchura de banda. En el caso de formas de onda musicales, esta dispersión del espectro de frecuencias de la señal puede aplicarse fructíferamente al enriquecimiento tímbrico.

Un instrumento de FM es un poco más complicado de entender que otro de síntesis aditiva. En la síntesis por modulación de frecuencia son necesarios dos osciladores como mínimo, un oscilador de portadora y un oscilador de modulación. De ordinario, ambos osciladores generan sencillas formas de onda sinusoidales, cuyas configuraciones de ataque y extinción están controladas por generadores de envolvente. Lo que se hace, en esencia, es desplazar continuamente en torno a un valor central la frecuencia del oscilador de portadora, en magnitud proporcional a la amplitud de la forma de onda generada por el oscilador de modulación. Por consiguiente, la frecuencia de la portadora no es ya constante, sino suma de la frecuencia media de la portadora más la salida continuamente variable del oscilador de modulación.

Cuando la frecuencia media de la portadora y la frecuencia de modulación son iguales, resulta que el período fundamental de la onda modulada en frecuencia será el mismo que el de la onda portadora sin modificar. Sí ha cambiado la forma de onda de la portadora. Puede demostrarse que conforme se aumenta la amplitud de la señal de modulación, aumenta también el número y la intensidad de las parciales armónicas de frecuencias superiores.

Supongamos que la envolvente de la onda moduladora tenga un ataque más plano que el de la portadora. En tal caso, las amplitudes de las parciales de alta frecuencia irán creciendo lenta-

mente hasta los valores correspondientes al estado estacionario. Eso es justamente lo que se requiere para lograr el timbre de un instrumento de metal. En realidad, el programa de ordenador que acabamos de describir produce timbres semejantes a los de los metales y requiere tan sólo dos osciladores y dos generadores de envolvente. Por contraste, para sintetizar timbres semejantes por la técnica de la síntesis aditiva hacen falta 10 osciladores y otros 10 generadores de envolvente.

Si la frecuencia de la moduladora no es igual a la de la portadora, las parciales de la señal modulada en frecuencia son inarmónicas. El espectro de frecuencias del sonido consiste en un apiñamiento de parciales centradas en la frecuencia de la portadora, y separadas unas de otras por un intervalo igual a la frecuencia de modulación. Con una frecuencia de modulación muy baja, se produce un conjunto muy denso de parciales, y el resultado es un sonido áspero y disonante. Si la frecuencia de modulación es mayor que la de portadora, las parciales inarmónicas se desparraman y producen timbres típicos de la percusión.

A pesar de que la FM no permite generar un espectro cualquiera de frecuencias, arbitrariamente especificado, Chowning mostró que sí es posible generar una gran tabla de sonidos, de interés musical, sin más que elegir bien las frecuencias y las envolventes de portadora y moduladora. Además, el sonido FM fundamental puede ser ulteriormente enriquecido por el sencillo procedimiento de sumar varias formas de onda de FM. El sintetizador Yamaha DX-7, que se basa en la síntesis de FM, dispone de seis osciladores para cada una de las 16 voces que es capaz de generar simultáneamente. Estos osciladores suelen estar agrupados en tres pares portadora-moduladora, cuyas señales de FM resultantes son sumadas a continuación.

Los métodos de síntesis aditiva y de síntesis por modulación de frecuencia, usados todavía hoy, son métodos primitivos de producción de sonidos musicales mediante ordenador. Otros métodos de más reciente desarrollo se valen de equipos digitales específicamente diseñados para fines musicales. Son varios, por ejemplo, los fabricantes de sintetizadores que han sacado partido del acusado descenso en los precios de los microcircuitos de memoria para almacenar, en conjuntos de muestras, copias de las formas de onda de instrumentos reales. Para cada uno de los sonidos instrumentales es preciso almacenar el ataque y parte del estado estacionario y de la extinción de la correspondiente forma de onda. La producción de tonos de diversas alturas musicales se consigue acelerando o decelerando el ritmo de enlace de las diversas formas de onda almacenadas. La calidad y la duración tonal puede ajustarse promediando y ensamblando sin discontinuidades secciones diferentes de las formas de onda almacenadas.

Mientras que las formas de onda "naturales" digitalmente almacenadas pueden producir sonidos "naturales", el sonido sintetizado no puede captar bien todos los matices de volumen, altura y timbre sonoro del fraseo de un pasaje musical. Por este motivo, es todavía mucho el trabajo que se está dedicando a mejorar la "naturalidad" de los sonidos, incluidos los construidos a partir de formas de onda básicas, como las ondas en diente de sierra.

Las ondas en diente de sierra son similares a las formas de onda de los sonidos producidos al rozar con el arco una cuerda de violín; empero, al escuchar mediante un altavoz las ondas en diente de sierra resultan desagradablemente ásperas. La diferencia entre un violín y un altavoz excitado por una corriente en diente de sierra estriba en que el cuerpo del violín favorece de modo natural ciertas frecuencias (las frecuencias resonantes) y en cambio amortigua otras. Análogamente, en el canto humano la voz se origina en vibraciones de las cuerdas vocales, que en sí mismas producen un ruido inclasificable. El timbre de la voz débese, casi enteramente, a las resonancias del tracto vocal.

Conocíanse ya estos principios de acústica musical desde el comienzo de la música por ordenador, pero no resultaba fácil su aplicación. Posteriores avances en el campo de los costes y las velocidades de los circuitos integrados posibilitaron que hoy simulemos ya en el ordenador las resonancias características de los sistemas naturales de emisión de sonidos.

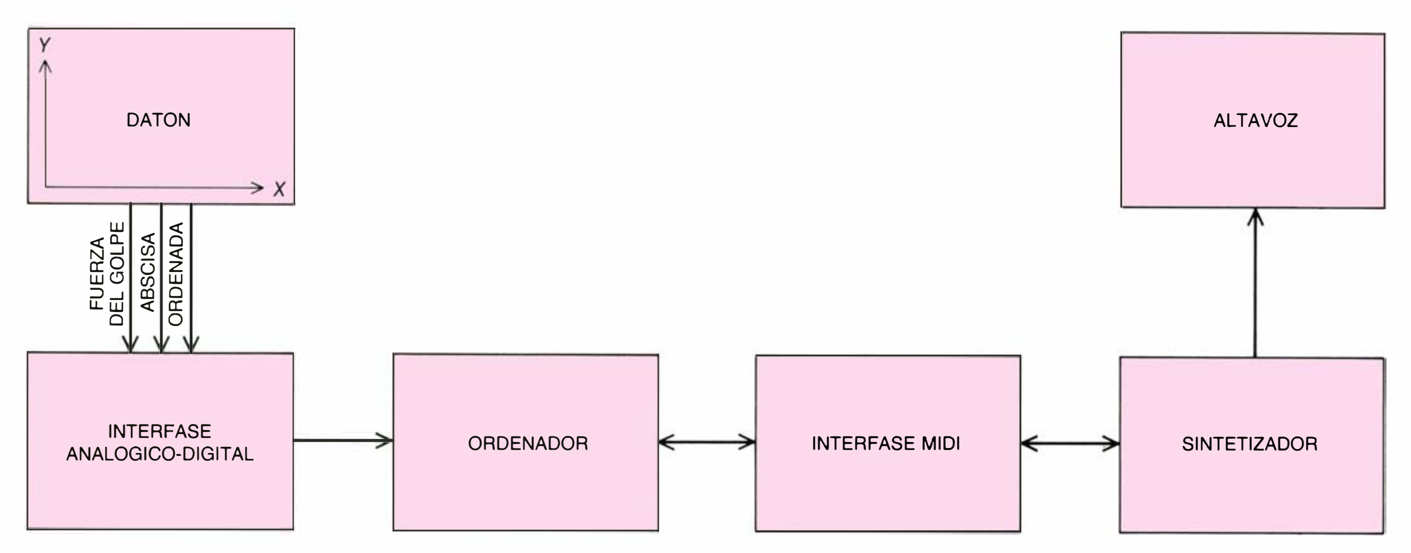
La síntesis sonora basada en esa idea comporta dos aspectos: una excitación general, tal como la proporcionada por una onda en diente de sierra, y una posterior extinción oscilatoria de varias de las principales resonancias. Así pues, la clave para producir sonidos similares al del violín a partir de ondas en diente de sierra yace en la simulación de la extinción oscilatoria de diversas componentes de frecuencias. El ordenador puede lograrlo resolviendo ecuaciones lineales en diferencias finitas, cuyo papel es análogo (en términos discretos) al de las ecuaciones diferenciales lineales. La solución de una ecuación diferencial lineal es una suma de sinusoides amortiguadas, las cuales pueden simular la progresiva extinción de las oscilaciones en la caja de resonancia del violín o en el tracto vocal.

El problema general que plantea este tipo de síntesis es que hacen falta grandes volúmenes de cómputo para resolver una ecuación en diferencias finitas. Carver A. Mead y John C. Wawrzynek, del Instituto de Tecnología de California, acaban de obtener microcircuitos integrados específicamente diseñados para la síntesis musical por solución de ecuaciones lineales en diferencias finitas. Si tales microcircuitos llegan a comercializarse, este procedimiento de síntesis dará un salto adelante.

No es que hoy se carezca de estrategias para la generación por medios digitales de sonidos musicales complejos y satisfactorios. El problema principal que plantea la mayoría de tales estrategias es el volumen computacional que requiere la producción de sonidos con timbres ricos y sensuales. Una estimación burda es que hacen falta del orden del millón de operaciones (multiplicaciones y adiciones) por cada segundo de sonido de cada instrumento, lo que da un total de 10 a 20 millones de operaciones por segundo en una obra grande. La prodigiosa cantidad de cómputos que comporta la síntesis de sonidos complejos ha impedido la generación efectiva de sonidos en tiempo real mediante ordenadores de uso general, es decir, sin necesidad de ir registrando a baja velocidad las muestras sonoras antes de poder oírlas a velocidad normal.

Los primitivos ordenadores no tenían apenas capacidad suficiente para sintetizar música en tiempo real. Los compositores sintetizaban sus piezas lenta y deliberadamente e iban registrando las muestras sonoras en cintas magnéticas digitales, que finalmente reproducían en tiempo real. Fue mucha y muy espléndida la música creada de este modo, y seguramente sea todavía el procedimiento mejor de hacer discos y llenar bandas sonoras, porque el compositor dispone de alto grado de control en la creación, evaluación y revisión de sus partituras.

Sin embargo, el proceso de grabación elimina un tipo de músico: el eje-



7. MIDI (Musical-Instrument Digital Interface) es un protocolo para la codificación digital de datos musicales, adoptado por los fabricantes de instrumentos musicales electrónicos. Permite que un sintetizador se comunique con un ordenador. En el instrumento datón (*véase la figura 6*), las señales eléctricas analógicas que especifican dónde y con cuánta fuerza fue golpeada la superficie son convertidas en números binarios y trasladadas a un ordenador. Este combina la información con las notas almacenadas en su memoria y envía la información compuesta en forma MIDI al sintetizador, para que genere los tonos apropiados.

cutante "en directo". Es preciso que los matices que la interpretación exija sean anotados en la partitura por el compositor; de lo contrario se perderán. También se echará de menos el placer de interpretar activamente la música, de suma importancia para los ejecutantes, sean profesionales o aficionados. Los oyentes de tal música pueden igualmente lamentar no tener oportunidad de tocar a través de las personas interpuestas de los músicos en los conciertos.

Aunque existen en la actualidad ordenadores de usos generales con potencia suficiente como para afrontar tareas musicales en tiempo real, por lo general resultan demasiado caros e incómodos de instalar; eso los convierte en instrumentos musicales poco prácticos, tanto en la sala de conciertos como en el hogar. La solución reside ciertamente en la producción de microcircuitos especializados y de alto rendimiento, como los utilizados por los sintetizadores Yamaha y los realizados de forma experimental por Mead y Wawrzynek. De hecho, los instrumentos de música digital basados en tales microcircuitos son, en muchos casos, más económicos que algunos instrumentos acústicos tradicionales.

A este respecto, tenemos para los músicos informáticos la buena noticia de que se ha establecido entre los fabricantes de instrumentos electrónicos comerciales un protocolo de interfase digital normalizada musical-instrumental (la llamada MIDI, o "Musical-Instrument Digital Interface"). Esta interfase permite conectar un ordenador a tales instrumentos, dotándolos así de cierta "inteligencia". En principio, el objetivo de MIDI fue normalizar la transmisión de informaciones de control entre diversas marcas de sintetizadores. La pulsación de una de las teclas del teclado de un sintetizador provisto de interfase MIDI no sólo tiene por efecto la emisión de un sonido, sino también la transmisión de ciertos datos binarios por un cable de salida, que permiten reconocer qué tecla ha sido la pulsada y con qué fuerza lo ha sido. El sintetizador puede igualmente tener una toma de entrada de señales MIDI. Al recibir a través de ella información sobre la pulsación de teclas, emitirá un tono sonoro, exactamente igual que si se hubiera pulsado una de sus propias teclas. En principio, todo cuanto pueda hacerse en un sintetizador puede controlarse sobre el terreno mediante sensores situados en la máquina (por ejemplo, teclas, botones o mandos) o controlarse a distancia, por intermedio de MIDI.

Aunque los creadores de MIDI pudieran no haber tenido el propósito de hacer servir su interfase de modo de comunicación entre un ordenador y un sintetizador, desempeña perfectamente este papel. Desde luego, le hace grata la vida a quienes gustan de jugar con ordenadores y sintetizadores, pues un ordenador personal corriente posee potencia sobrada para la mayoría de las tareas de control musical, dado que la tarea de generación de las formas de onda le está encomendada a los circuitos especializados del sintetizador propiamente dicho. Los componentes esenciales de un tal instrumento inteligente son el sintetizador, el sensor, sobre el cual toca el ejecutante, el ordenador y, por último, pero no menos importante, la programación necesaria para enlazar entre sí todos estos elementos.

Aunque los métodos que hemos venido describiendo para la síntesis sonora han servido para imitar los instrumentos tradicionales, el equipo electrónico digital puede con igual facilidad crear clases enteramente nuevas de sonidos. Es más, una forma de onda digitizada por muestreo, ya sea por registro digital de sonidos de un instrumento "real", o manufacturada en un ordenador, se presta fácilmente a ser manipulada. Por medio de un procesamiento digital, un sonido particular puede transformarse en otro totalmente diferente. Por ejemplo, los espectros de frecuencia y las envolventes características del habla humana pueden moldearse para que suenen, pongamos por caso, como el rugido de un león.

El ulterior estudio mediante ordenador de los sonidos musicales permitirá, sin duda, imitaciones más exactas de los instrumentos tradicionales y conducirá a la concepción y puesta a punto de medios para controlar más rápida y sutilmente sus cualidades sonoras, lo cual es de la máxima importancia en la ejecución musical real. Asimismo, los ordenadores tienen un papel clave para elucidar la respuesta subjetiva que los sonidos educen. Para el compositor moderno tal hecho reviste particular interés, pues no queda ya obligado a disponer y organizar sonidos producidos por los instrumentos acústicos tradicionales; es ahora posible emitir cualquier sonido imaginable, e incluso algunos que no lo son.

Juegos de ordenador

El juego Vida cuenta ya con sucesores en tres dimensiones

A. K. Dewdney

Vida, el popular juego de un autómata celular que se desarrolla sobre una cuadrícula bidimensional, ha inspirado ahora algunas analogías en tres dimensiones. Carter Bays, especialista en ciencias de cómputo de la Universidad de Carolina del Sur, ha explorado una amplia gama de variantes tridimensionales, dos de las cuales le parecen sumamente prometedoras. Bays las denomina Vida 4555 y Vida 5766. Ambas reproducen muchas de las características del juego Vida original (como sus "intermitentes" y sus "patines"); una de las versiones sin duda ganará plaza de meritorio asociado del juego inventado en 1968 por el matemático John Horton Conway, de la Universidad de Cambridge.

Como muchos lectores recordarán, por haberle dedicado Martin Gardner varios de sus artículos de "Juegos matemáticos" [véase al respecto "Ruedas, Vida y otras diversiones matemáticas", por Martin Gardner, Editorial Labor, 1985], el juego Vida se desarrolla sobre un casillero bidimensional infinito, de casillas cuadradas. Cada celdilla, o "célula", tiene ocho vecinas (cuatro por los vértices y cuatro por los lados) y puede encontrarse en dos estados: viva o muerta. Un gran reloj universal va marcando el tiempo. A cada golpe de péndulo algunas de las células cobrarán vida, mientras que otras quizá mueran. La suerte de cada célula está determinada por el número de sus vecinas con vida. Por ejemplo, si una célula viva tiene menos de dos vecinas vivas o más de tres, al dar el reloj uno de sus tics, aparecerá muerta al tic siguiente, lo que se justifica como efecto de la desnutrición o de la superpoblación. Por el contrario, las células muertas pueden resucitar en la marca temporal siguiente si tienen exactamente tres vecinas vivas: los nacimientos requieren tres "progenitores".

Conway llamó Vida a su juego porque las casillas pueden estar "vivas" o "muertas". Pronto quedó claro que el nombre resultaba mucho más adecuado de lo que se sospechaba. Diversas configuraciones de células vivas exhiben un comportamiento de complejidad sorprendente, casi biológico [*véase la figura 2*]. El comportamiento es cíclico: a cada golpe de reloj la configuración cambia, pero al cabo de un número finito de señales marcadas por el cronómetro reaparecen las configuraciones originales. Unas formaciones celulares permanecen estacionarias; otras viajan a través del cuadriculado, moviéndose una casilla por vez, sea en dirección horizontal, vertical u oblicua. Ambos tipos de configuración han recibido nombres muy imaginativos. Entre las estacionarias encontramos faros, colmenas, bloques e intermitentes; entre las viajeras, patines y astronaves. La Vida de Conway no se limita a remedar malamente fenómenos naturales. Como ya hice notar en esta sección en julio de 1985, puede incluso construirse un ordenador en el seno del plano celular de Vida.

A nadie sorprenderá que, en el holgado espacio celular de tres dimensiones, ciertas versiones análogas del juego de Conway generen fenómenos más fantásticos incluso. Tales versiones son Vida 4555 y Vida 5766, de Carter Bays. En ellas, las células no son cuadradas, sino cúbicas, y tienen 26 vecinas en lugar de ocho.

Las denominaciones Vida 4555 y Vida 5766 derivan de un sobrio léxico ideado por Bays. Los dos primeros dígitos dictan la suerte de las células vivas. El primero estipula el número mínimo de vecinas vivas que han de rodear a la célula para que no perezca por desnutrición; el segundo, el máximo de las que puede tener sin que la asfixie la superpoblación. El tercer y cuarto dígitos gobiernan la suerte de las casillas muertas. El tercero indica el número mínimo de vecinas vivas que ha de tener la casilla para que cobre vida; y el cuarto, el máximo de las vecinas que puede tener para cobrar vida. (En todas las versiones de Vida que veremos aquí los números tercero y cuarto serán idénticos; sin embargo, en general no tiene por qué ser de esa manera.) Así pues, según la notación de Bays, la Vida de Conway es Vida 2333.

Vida 4555 funciona con simplicidad comparable a la de Vida 2333. Las células vivas mueren si tienen menos de cuatro o más de cinco vecinas vivas. Bays se sintió atraído por Vida 4555 al observar, durante una investigación rutinaria de las reglas correspondientes a esa gama de valores, que una extraña configuración de celdillas cúbicas salía serpeando de las profundidades de la pantalla de su Macintosh [*véase la figura 3*]. Se trataba de un patín, o deslizador, tridimensional, que atravesaba cíclicamente cuatro formas distintas hasta repetirse a sí mismo. Las formas intermedias constaban de 10 cubos dispuestos en formación oblonga, extrañamente roma, que se desplazaban por el espacio recordando un sofá en caída libre.

Movido por la curiosidad, Bays decidió calar un poco más en las reglas de 4555 y preparó una serie de experimentos para estudiar la "sopa primordial". Puso en marcha su universo celular sembrando un espacio inicial con cubos que cobraban vida al azar. En cada generación, el número de cubos vivos iba menguando, pero Bays observó ciertas agrupaciones curiosamente estables, que no cambiaban de una generación a la siguiente. Algunas le recordaban pedestales, cruces, escalones y barras de pesas de halterofilia [*véase la figura 4*]. En cosechas posteriores obtuvo más configuraciones estables, así como muchas de comportamiento cíclico, a las que Bays ha dado nombres tan extravagantes como rotor y potro cerril.

Cual físico nuclear que dispusiera de nuevas partículas, Bays ideó colisiones entre los patines y otras configuraciones, provocando la intercepción desde todos los ángulos concebibles. "Entre las colisiones más sorprendentes", hace notar, "destaca la de un patín contra una bola, en la cual la confusa masa resultante prolifera hasta una población de 29 miembros, lo cual no resulta especialmente admirable, pero de pronto reaparece el patín, rezagado varias generaciones y un tanto desviado".

Bays llama "naturalezas" a los productos de las sopas primordiales, e incluso a los resultados de las colisiones con patines. Ciertas configuraciones se obtienen con toda facilidad. Otras, más exóticas, requieren más trabajo. Por ejemplo, pueden engancharse dos configuraciones en forma de arco y construir una nueva configuración estable que Bays llama arcada. Aflora así toda una arquitectura de vallas, escaleras, paredes y cadenas. Se curvan los muros y se transforman en hélices y en una

gran variedad de exóticas configuraciones estables, sólo limitadas por la imaginación del entusiasta de Vida 4555 [*véase la figura 1*].

Otros fenómenos merecen un lugar en estas páginas. Existe una forma solitaria compuesta por siete cubos, llamada "saludadora", que muere a menos que se encuentre en presencia de otra de su propia estirpe. Al pasar junto a una saludadora, los patines quedan atrapados en ella y detienen su avance. Si hay suerte, otro patín rescatará a su semejante, chocando contra la saludadora y haciéndola explotar.

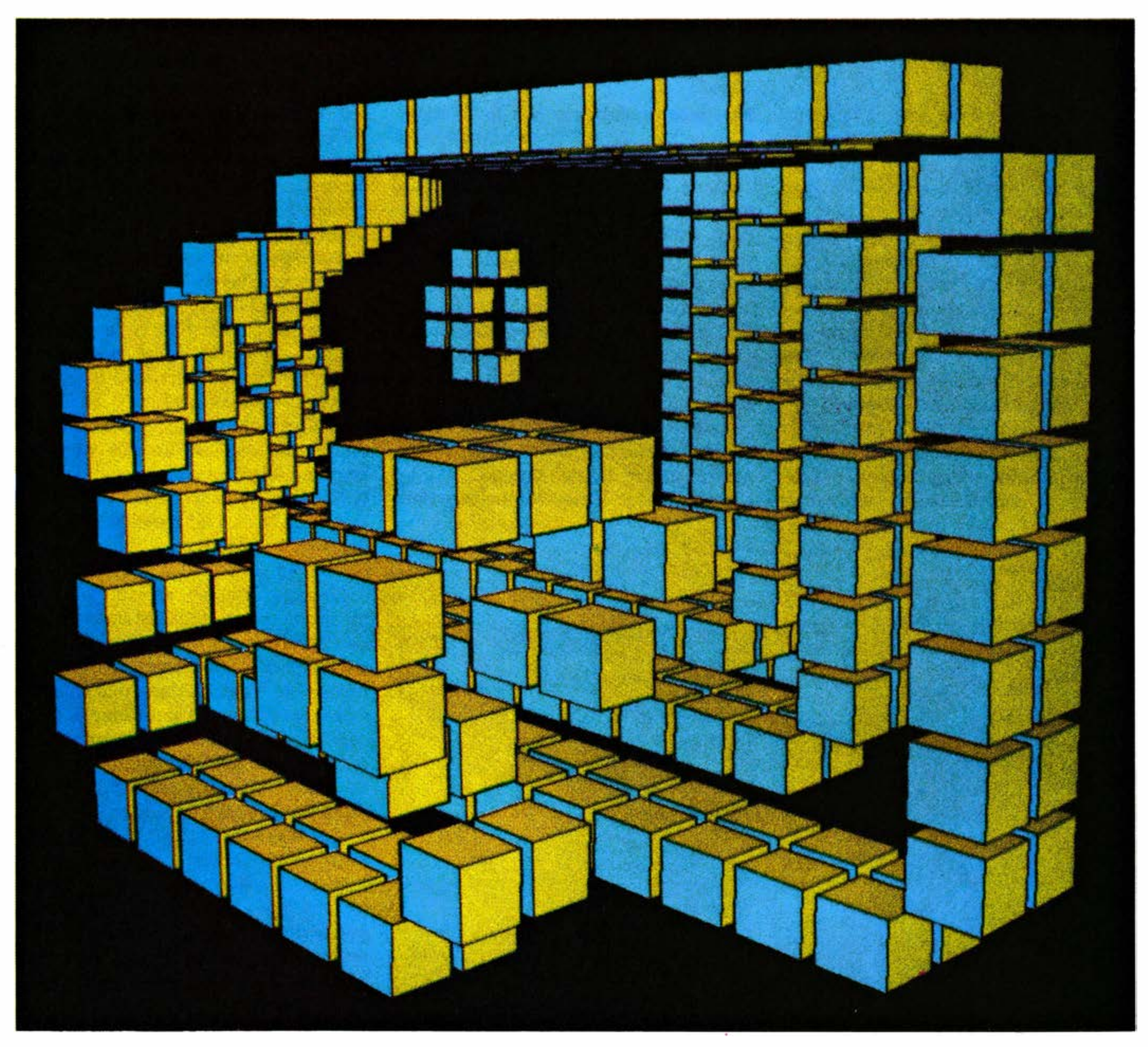
Parece que, de las dos fructíferas versiones tridimensionales descubiertas por Bays, Vida 4555 es su favorita. Adviértase que los dígitos de Vida 4555 se obtienen sumando 2 a las cifras del código que denota la Vida de Conway, que es 2333. Tal vez esa coincidencia vaticine el meritorio lugar que Vida 4555 haya de ocupar junto a Vida de Conway.

Sin embargo, en sentido estricto, Vida 5766 remeda más de cerca el juego de Conway que Vida 4555. En particular, bajo ciertas condiciones, Vida 5766 simula la Vida de Conway en el plano. Tales condiciones vienen estipuladas por un teorema formulado por Bays.

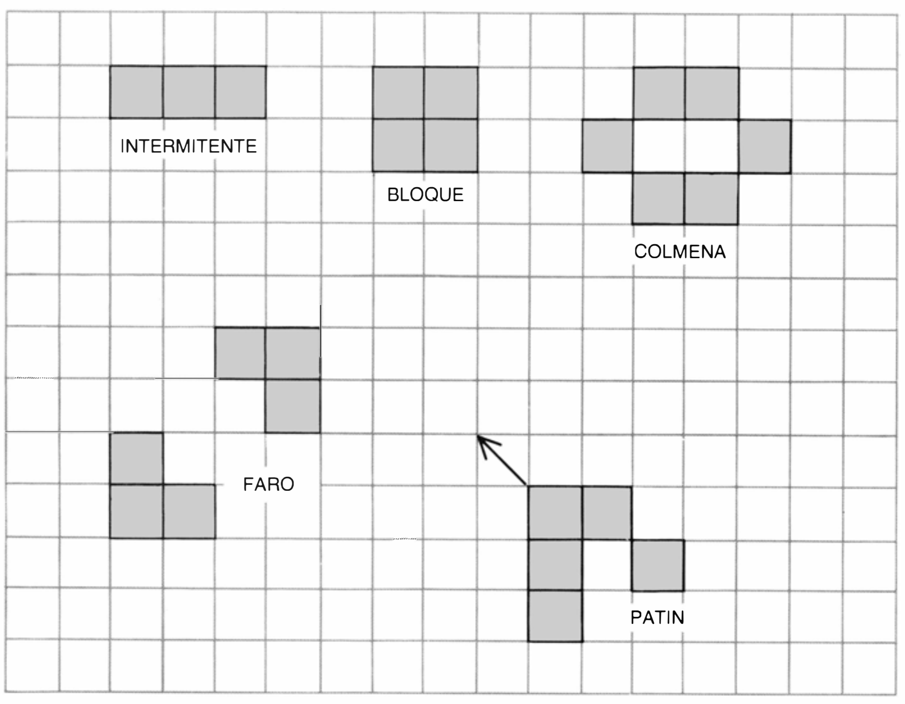
Imagínese que miramos desde arriba el cuadriculado plano sobre el que se desarrolla la Vida de Conway, y que observamos en él una determinada configuración de casillas vivas (cuadradas). Situemos ahora un cubo vivo encima de cada una de las casillas vivas de la configuración y otro debajo. De acuerdo con las reglas de Vida 5766, los cubos remedarán eterna y perfectamente el comportamiento de las células de Conway emparedadas entre ellos si (y solamente si) se cumplen dos condiciones:

1. Ninguna casilla cuadrada del plano que esté viva presenta nunca más de cinco casillas vecinas vivas.
2. Ninguna casilla cuadrada del plano que esté muerta tiene nunca más de seis vecinas vivas.

Muchas configuraciones de Vida, incluidos los patines, o deslizadores, de Conway, respetan las condiciones anteriores. Puede crearse un deslizador en Vida 5766 convirtiendo un deslizador bidimensional en dos capas de cubos. El deslizador ocupa dos capas adyacentes de casillas del espacio tridi-



1. Un patín se abre paso a través de una hélice estable en Vida 4555 tridimensional, de Carter Bays



2. Muestras de seres de la Vida bidimensional de John Horton Conway

mensional y está condenado a moverse eternamente sin salir de ellas [*véase la figura 5*].

Otras muchas figuras de la Vida de Conway, como el faro, la colmena, el intermitente y el bloque, al igual que otras configuraciones más exóticas, así el barco, el reloj y el poste del barbero, verifican también las condiciones del teorema de Bays. Se presentan en versiones de dos capas que se comportan exactamente igual que sus correspondientes bidimensionales. Desdichadamente, no todas las configuraciones de la Vida de Conway obedecen esos criterios. Entre las ovejas negras de la familia se cuenta el famoso cañón lanzapatines descubierto por R. William Gosper, Jr., en 1970, siendo alumno del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Si se inspecciona el cañón lanzapatines en una fase cualquiera de su ciclo vital se advierte la presencia de células vivas que tienen cinco vecinas vivas. Toda violación de alguna de las dos condiciones de Bays provoca una desviación de conducta respecto de la que pretende simular. "Cuando así ocurre", informa Bays, "el objeto, que hasta entonces estaba confinado en dos planos, forma casi siempre una masa tridimensional redondeada, que de ordinario muere al poco tiempo".

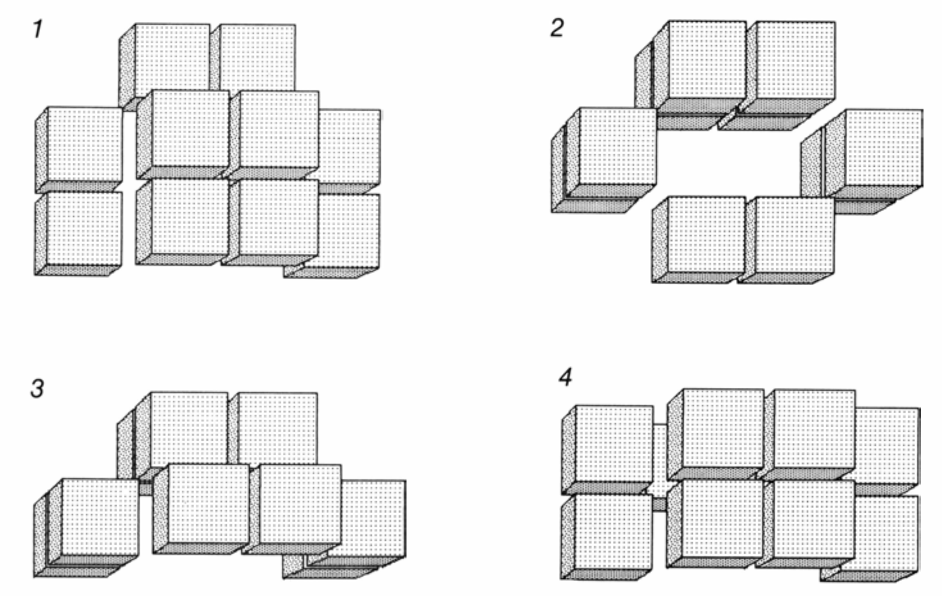
Se logra que Vida 5766 remede más plenamente la Vida de Conway erigiendo lo que Bays denomina una barrera espacio-temporal. Consiste ésta en una única hoja de células vivas múltiplemente perforada de orificios [*véase la figura 6*]. Los huecos están dispuestos de tal modo que cada cubo de la barrera tiene exactamente siete vecinos. Los cubos vivos de la barrera están a punto de perecer por superpoblación, mientras que cualquier cubo situado en una capa adyacente a la barrera tendrá más de seis vecinos vivos, por lo que nunca podrá cobrar vida. Se saca partido de la zona muerta existente a cada lado de la barrera espacio-temporal para reproducir exactamente la Vida de Conway. Se construye un emparedado consistente en dos barreras espacio-temporales situadas a cuatro cubos de distancia una de otra. De los cuatro planos que intervienen, los dos centrales pueden soportar cualquiera de las formas de Vida bidimensional: las dos condiciones del teorema de Bays las cumplirá ahora cualquier población de cubos vivos que ocupe la rebanada central del emparedado.

Pese a remedar la Vida de Conway en una u otra forma, Vida 5766 carece de lo que pudiéramos llamar "garra" celular. Según Bays, las sopas primordiales aleatorias de Vida 5766 casi siempre parecen "asentarse" más rápidamente que las de Vida 4555. Esa mayor "inestabilidad" de Vida 4555 apunta que en ella debe ser más amplia la gama de posibilidades computacionales. En efecto, Vida 4555 tiene profusión de formas estables y de formas oscilantes simétricas. Quizá la decisión final sobre cuál de las dos versiones haga mejor papel como compañera de la Vida de Conway estribe en si se logrará que Vida 4555 simule el juego bidimensional. De ser así, Vida 4555 superaría en todo a Vida 5766.

Debería resultar sencillo –cuando menos en teoría– redactar un programa que compute y presente las sucesivas generaciones de cualquiera de ambas formas de Vida. Incluso puede modificarse el programa para efectuar una exploración de otras reglas, con la esperanza de descubrir una tercera forma de Vida tridimensional que Bays pudiera haber dejado de lado.

A dos grandes tablas tridimensionales llamadas *casillas* y *casinuevas* se les asignan tres índices, i, j y k, correspondientes a las tres coordenadas del espacio celular. El contenido de cada elemento de la tabla indica si la correspondiente célula está viva o muerta. Hagamos que 1 signifique vida y, 0, muerte.

Como era de esperar, hacen falta



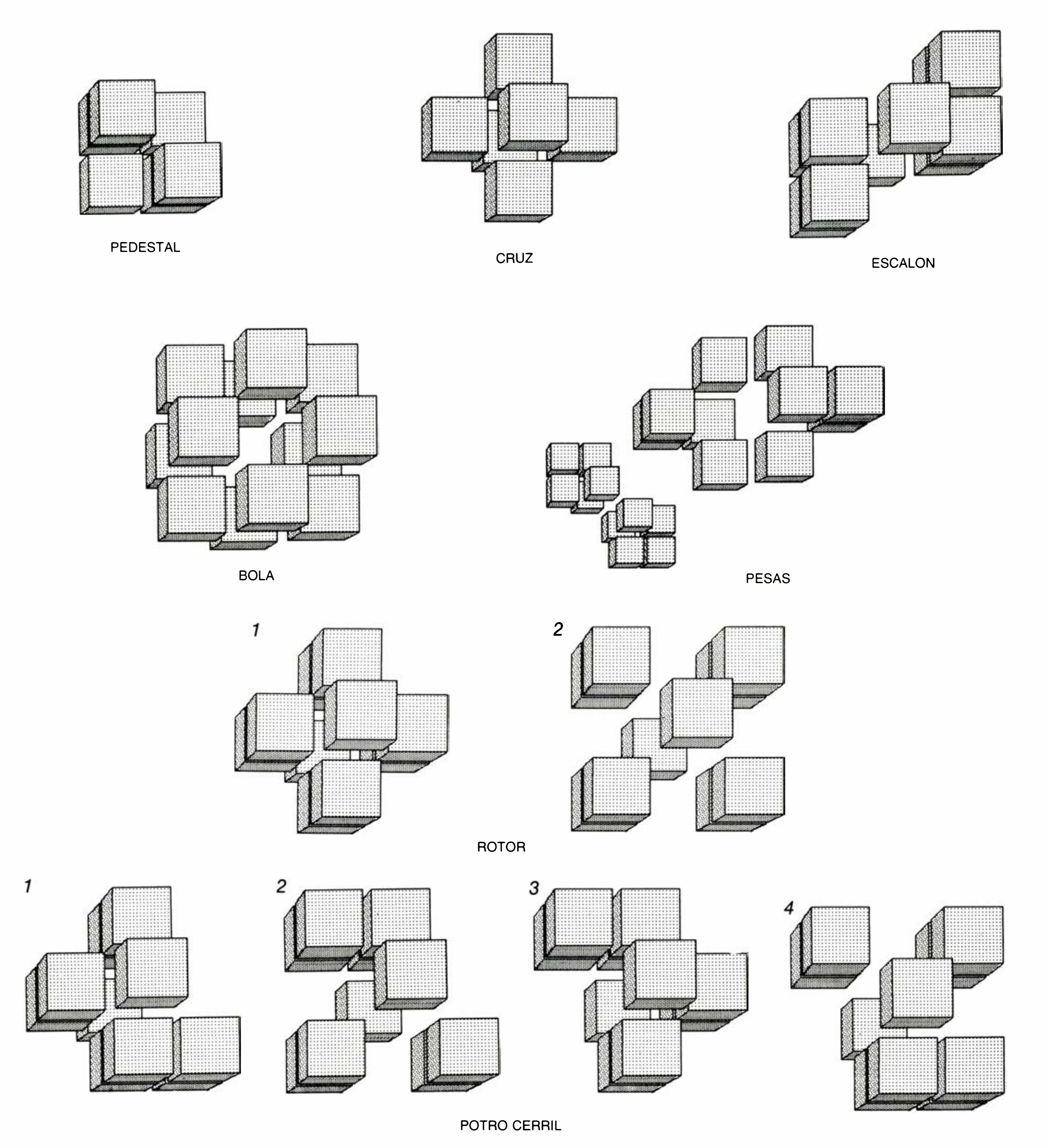
3. Un patín de Vida 4555

tres bucles encajados para calcular el estado de cada célula en cada generación. El bucle externo se vale del índice i para computar una sucesión de planos que vaya barriendo el espacio. En el seno de ese bucle se encuentran otros dos, que se valen de los índices j y k, respectivamente. El bucle de índice j va calculando las sucesivas filas que componen cada plano, y el índice k se encarga de examinar las sucesivas celdillas de una fila. Puede utilizarse entonces como guía la siguiente formulación genérica:

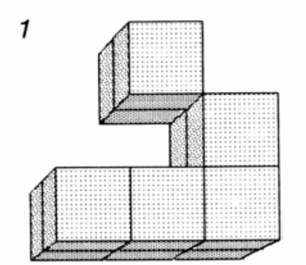
desde $i = 1$ hasta 30
  desde $j = 1$ hasta 30
    desde $k = 1$ hasta 30
      computar las casillas vecinas
      determinar el estado correspondiente
      mostrar los cubos vivos

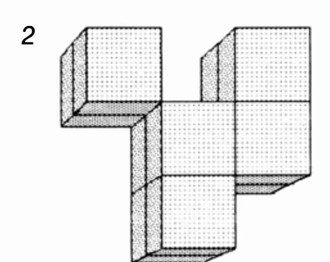
El número 30 es arbitrario, por supuesto. Sin embargo, los ensayos con números mayores que 30 sólo se recomiendan a lectores dotados de paciencia infinita, porque el tiempo de cálculo resulta superlativamente largo.

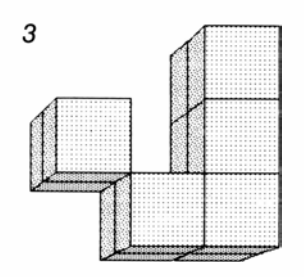
El programa debe realizar en el seno del bucle más interno tres tareas esenciales. La tarea *computar las casillas vecinas* exige que el programa examine las 26 células vecinas de cada casilla y

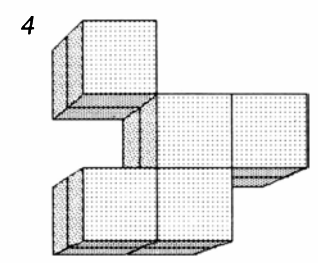


4. Formas estables y formas cíclicas en Vida 4555









5. Un patín de Vida 5766 tridimensional de Bays

halle el número total de las que se encuentran con vida. Se logra con tres bucles diminutos y, también, por el procedimiento de enumerar la totalidad de posibles coordenadas de las 26 casillas. En forma de bucle, el procedimiento podría utilizar el algoritmo siguiente:

```
tot ← 0
desde l = i − 1 hasta i + 1
   desde m = j − 1 hasta j + 1
      desde n = k − 1 hasta k + 1
         si casillas(l,m,n) = 1
            entonces tot ← tot + 1
tot ← tot − casillas(i,j,k)
```

La última línea del procedimiento garantiza que el estado de *casillas*(i,j,k) no contribuya al total.

Una vez que ha establecido el total *tot* de vecinas vivas, el programa debe decidir a continuación qué nuevo estado corresponde a la célula objeto de consideración, *casillas*(i,j,k). La tarea *determinar el estado correspondiente* consiste en una mera comparación del tamaño de *tot* con el estado de *casillas*(i,j,k):

```
si casillas(i,j,k) = 0
   entonces si tot = 5
      entonces casinuevas(i,j,k) ← 1
      y si no, casinuevas(i,j,k) ← 0
si casillas(i,j,k) = 1
   entonces si tot < 4 o tot > 5
      entonces casinuevas(i,j,k) ← 0
      y si no, casinuevas(i,j,k) ← 1
```

He supuesto aquí que el lector está programando Vida 4555. Se puede alterar el algoritmo para que corresponda a Vida 5766, y también hacerlo suficientemente general para manejar cualquier regla tridimensional que se quiera. Creo que llegados a este punto valdrá la pena una pequeña digresión al respecto.

Una versión general de la precedente determinación de estados podría utilizar cuatro variables, que Bays llama *ea, eb, fa*, y *fb*. Las letras *e* y *f* denotan entorno y fertilidad, mientras que *a* y *b* expresan los valores máximo (alto) y mínimo (bajo). Así pues, *ea* y *eb* denotan las cotas superior e inferior que consienten la supervivencia ininterrumpida de una célula en su entorno; la célula permanecerá con vida si el número de células vivas que la rodean es mayor o igual que *eb*, pero menor o igual que *ea*. De igual modo, *fa* y *fb* determinan los límites de fertilidad correspondientes a las células muertas. Su renacer está garantizado si el número de cubos que la rodean es mayor o igual que *fb*, pero menor o igual que *fa*. En consecuencia, el agoritmo general es

```
si casillas(i,j,k) = 0
   entonces si tot < fb o tot > fa
      entonces casinuevas(i,j,k) ← 0
      y si no, casinuevas(i,j,k) ← 1
si casillas(i,j,k) = 1
   entonces si tot < eb o tot > ea
      entonces casinuevas(i,j,k) ← 0
      y si no, casinuevas(i,j,k) ← 1
```

En este punto de cualquiera de las versiones de un programa Vida tridimensional, el contenido de *casinuevas* puede trasladarse a casillas mediante un bucle triple apropiado. Con lo cual *casinuevas* queda libre para la siguiente generación de cubos vivos.

En la etapa final del proceso de cómputo, *mostrar los cubos vivos*, el programa presenta en la pantalla el cubo concreto de que se trate, si es que está vivo. Cuando se dibujen tales cubos convendrá llenar con alguna textura o color las caras visibles; si solamente se utilizan los esqueletos mondos la escena que resulta está muy apiñada y casi indescifrable. La forma más sencilla de que los cubos situados por delante oculten adecuadamente a los situados tras ellos consiste en asegurarse de que el índice *i*, el del bucle más externo, vaya barriendo desde la parte trasera del espacio celular hacia la delantera con relación al observador. El hecho triste de que algunos cubos queden ocultos al proceder de este modo constituye la única desventaja intrínseca de cualquier versión tridimensional de Vida: no podemos gozar de una visión general de todo lo que está ocurriendo, como era el caso de la versión bidimensional de Conway. También así es la vida; compartimos en nuestro mundo tridimensional real las desventajas de cualquier juego tridimensional: no podemos ver todo cuanto acontece (lo que en el fondo es una suerte).

Al incluir en un programa la fase final del proceso de cómputo, el funcionamiento de éste resultará francamente lento. Una simplificación que acelera algo las cosas consiste en remplazar los cubos por esferas (en realidad, discos llenos, cuyo tamaño varía en función de su "profundidad" respecto de la pantalla). Por su parte, Bays ha ideado diversas posibilidades para mejorar la velocidad en muchos órdenes de magnitud.

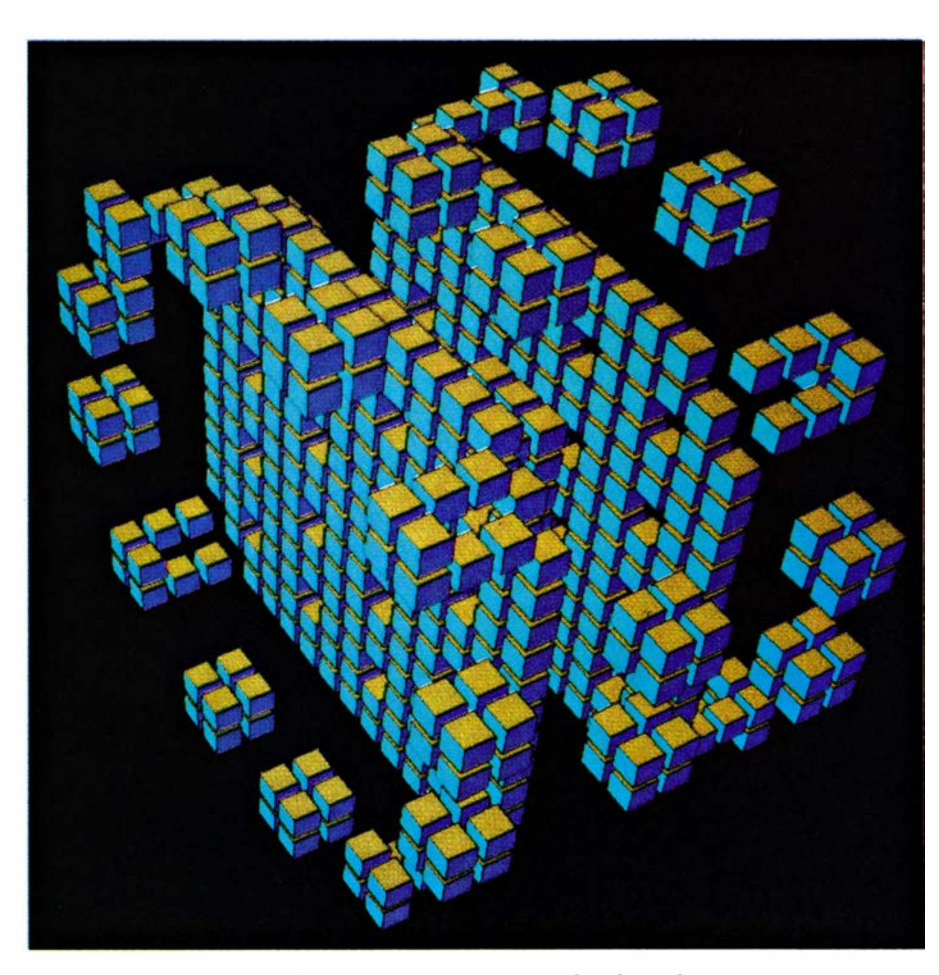
Como siempre, será un placer dar cuenta de cualesquiera fenómenos insólitos o interesantes que los lectores descubran. Primera cuestión, dirigida a esos intrépidos exploradores que exigen máxima generalidad, ¿existen formas de Vida tridimensional (dignas de ese título) que se le hayan escapado a Bays? En segundo lugar, tal vez les agrade a los lectores preparar sus propias sopas primordiales. Por lo demás, uno se pregunta qué patines, astronaves, cañones lanzapatines y demás configuraciones notables quedan por descubrir.

El juego que yo identifiqué como Star Trek en el artículo de enero existió, cuando menos en espíritu, mucho antes que la popular serie de televisión del mismo nombre. Robert Leonard Nelson, Jr., de Austin, Texas, recuerda que a principios de la década de 1960 se redactó para el ordenador PDP-1, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, un juego llamado Spacewar! –el abuelo de todos los juegos consistentes en derribar naves espaciales. Según un artículo aparecido en *Creative Computing* [véase la "Bibliografía", al final de este número], los autores del juego eran profesores y estudiantes posgraduados del MIT, que tenían a orgullo llamarse a sí mismos "hackers".

Por supuesto, programar el PDP-1

resultaba tarea ardua; los parámetros iniciales del programa y las entradas de datos tenían que cargarse a mano desde interruptores situados en las consolas. Uno de los miembros del grupo, J. Martin Graetz, describe la atmósfera que motivó los rápidos avances logrados pese a esos obstáculos. "Cuando los 'hackers' se calientan, todo cuanto pueda suceder ocurrirá... [el juego] Spacewar! funcionó perfectamente, controlado desde los conmutadores de que disponía la consola para verificación de las palabras; un solo inconveniente: el tubo de rayos catódicos estaba hacia un lado, con lo que uno de los jugadores tenía ventaja visual. Y lo que era más serio, con dos excitables guerreros espaciales apretujados en el espacio previsto para un operador en calma, el peligro de averiar el material era constante."

Kenneth L. VanEseltine, de Schoolcraft, Michigan, ha pulido el programa de batalla espacial que describí en enero pasado. Al principio lo bautizó STAR TRUCK (Camión estelar) a causa de su lentitud. Solamente pudo convertirse en STAR TREK cuando encontró formas de sacar del bucle principal casi todas las operaciones aritméticas con números reales (o números de "coma flotante", como se les llama en la jerga). Tiene igualmente algunas otras indicaciones que compartir con sus prójimos, los lectores. Para evitar el cálculo de raíces cuadradas, rellenó previamente una tabla bidimensional con las distancias desde todos los puntos (x,y) posibles al origen (0,0). La distancia entre dos puntos arbitrarios (x_1,y_1) y (x_2,y_2) se calcula entonces consultando en la tabla la distancia correspondiente a $(x_1 - x_2, y_1 - y_2)$. VanEseltine tabuló igualmente senos y cosenos en dos tablas de 36 elementos cada una, para valores de 10 en 10 grados. Descubrió también que los misiles se manejan mejor si siempre se tienen 20. Como es obvio, en un momento dado es probable que muchos de ellos sean virtuales, en cuyo caso, sencillamente, no se dibujan. Además, las tablas de velocidad no deberían ser bidimensionales, sino, preferiblemente, tablas unidimensionales emparejadas. En muchos ordenadores, esta sencilla redefinición permite rebajar considerablemente el tiempo de cómputo. Los lectores más decididos redescubrirán sin duda muchas de las otras mejoras de velocidad que ha encontrado VanEseltine.



6. Dos barreras espacio-temporales de Vida 5766

Taller y laboratorio

Se revela el secreto de la rapidez de cocción de los hornos de microondas

Jearl Walker

El secreto de la rápida acción de un horno de microondas reside en que el agua de los alimentos absorbe con rapidez la energía de las ondas. Lo que no deja de resultar sorprendente a primera vista. En la mayoría de los casos en que una sustancia absorbe luz, u otro tipo de radiación electromagnética, debe haber un acoplo resonante entre la energía de la radiación y los cambios energéticos posibles en los átomos y moléculas de la sustancia. El agua absorbe la radiación infrarroja de modo resonante, pero la frecuencia de las microondas es demasiado baja para tal acoplo resonante. Así pues, ¿cómo se transfiere la energía desde las microondas hasta el movimiento térmico aleatorio de las moléculas de agua? Voy a abordar algunas hipótesis que representan otros tantos tanteos en busca de una respuesta. Pero antes necesitamos conocer algunas nociones acerca de la física de las microondas y de la molécula de agua (H_2O), compuesta por dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno.

Las frecuencias de las microondas abarcan desde 1×10^9 hertz (ciclos por segundo) hasta 5×10^{12} hertz, muy por debajo de la frecuencia de la luz visible (6×10^{14} hertz, aproximadamente). Las ondas que emite mi horno son de $2,45 \times 10^9$ hertz, o sea, 2,45 gigahertz. Salvo por su frecuencia, las microondas y la luz visible son similares: ambas pueden representarse a modo de ondas de campos eléctricos oscilantes.

El campo eléctrico de una microonda puede girar una molécula de agua en virtud de la distribución de la carga eléctrica en su interior. Los electrones (de carga negativa) asociados a los átomos de hidrógeno se corren hacia el átomo de oxígeno instados por la fuerte atracción que sienten hacia los ocho protones, positivamente cargados, que tiene el oxígeno. Ese desplazamiento hace negativo el lado de la molécula correspondiente al oxígeno, y positivo el correspondiente al hidrógeno. Una carga así distribuida se llama dipolo eléctrico. Entonces, aunque la molécula en su conjunto sea eléctricamente neutra, forma un campo eléctrico en derredor suyo y puede girar por efecto de un campo eléctrico exterior. El momento dipolar es el producto de la carga neta en cada extremo por la separación entre ambas; se representa mediante un vector que apunta desde el borde negativo del oxígeno a lo largo de la línea de simetría entre los extremos hidrogénicos.

Habitualmente, los momentos dipolares del agua están orientados al azar. Pero si aparece un campo eléctrico, éste crea un momento de giro en cada molécula, obligándola a rotar para que coloque su momento dipolar paralelamente al campo. Imaginemos el campo eléctrico producido por dos placas cargadas paralelas. Ese campo está dirigido desde la placa positiva hacia la negativa. Una molécula de agua girará de modo que presente su extremo negativo a la placa positiva y sus extremos positivos a la placa negativa, alineándose así con el campo.

Constantemente, cada molécula se ve zarandeada por el movimiento térmico aleatorio de las circundantes. Ese movimiento estocástico, llamado a veces movimiento browniano, está relacionado con la temperatura del agua. El calor comunica a las moléculas más energía cinética, de suerte que, en su movimiento aleatorio, colisionan con mayor violencia unas con otras. Así se eleva la temperatura.

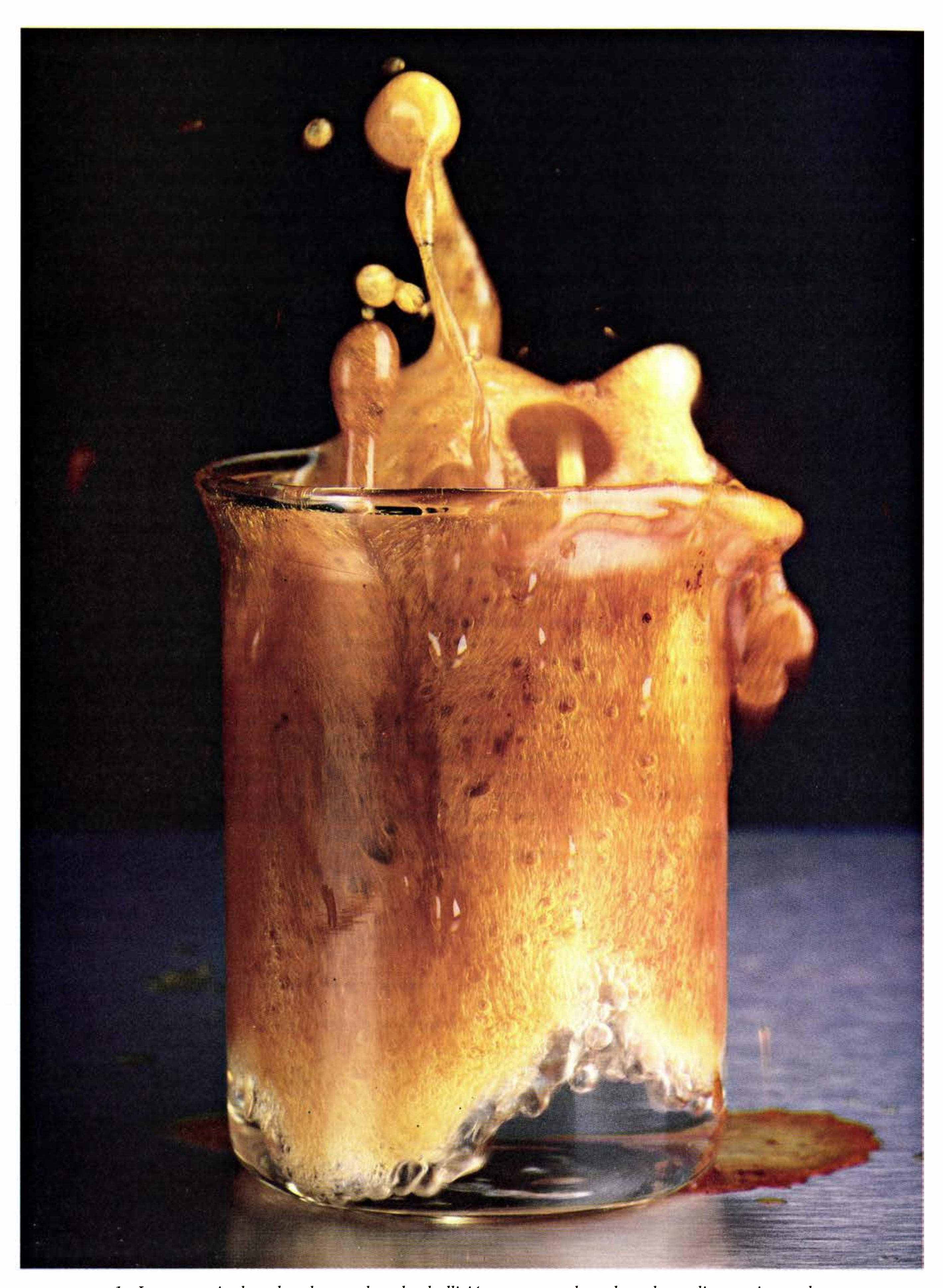
La polarización del agua se expresa mediante el momento dipolar neto existente por unidad de volumen. Cuando los momentos dipolares estén orientados al azar, será cero, ya que por cada momento apuntando en una dirección y sentido habrá otro apuntando en sentido contrario. Cuando un campo eléctrico comienza a alinear los momentos dipolares, aumenta la polarización. Alcanzaría el valor máximo si todos los dipolos se alinearan. Sin embargo, el movimiento aleatorio desalinea continuamente los dipolos y mantiene la polarización por debajo de su nivel máximo.

Veamos ahora la primera hipótesis. A principios de siglo, el ilustre físico holandés Peter J. W. Debye demostró matemáticamente por qué el agua absorbe con tal intensidad la energía de las microondas. El hecho esencial es que las moléculas de agua no pueden rotar instantáneamente para alinearse con el campo eléctrico. Al poseer una masa repartida en un cierto volumen, necesitan un tiempo para que el momento de giro las haga rotar. Además, las fuerzas retardadoras que ejercen las moléculas vecinas afectan asimismo a esa rotación.

El tiempo de respuesta del agua podemos definirlo en función del debilitamiento de su polarización cuando se anula repentinamente el campo eléctrico. El movimiento aleatorio comienza entonces a destruir la alineación de los momentos dipolares, lo que rebaja exponencialmente la polarización con el tiempo.

El tiempo de respuesta del agua determina si los momentos dipolares son capaces de seguir el ritmo de las oscilaciones del campo eléctrico de una onda electromagnética. A bajas frecuencias, el tiempo que tarda el campo eléctrico en cambiar de sentido es mayor que el tiempo de respuesta de los dipolos, y la polarización se mantiene en fase con el campo eléctrico. Este aporta la energía necesaria para que las moléculas giren y se alineen. Parte de esa energía se traspasa al movimiento estocástico cada vez que una colisión desalinea un dipolo y, luego, éste vuelve a alinearse. Ese trasvase de energía es, empero, tan pequeño que la temperatura apenas sube. Si el campo eléctrico oscila rápidamente, cambiará de sentido en menor tiempo que el de respuesta de los dipolos. Y como éstos no girarán, no habrá absorción de energía, ni el agua se calentará.

En la gama de frecuencias de las microondas, el tiempo que tarda el campo en cambiar es casi igual al tiempo de respuesta de los dipolos. Estos rotan obligados por los momentos de giro a que se ven sometidos, pero la polari-



1. La presencia de polvo desencadena la ebullición en agua sobrecalentada mediante microondas

zación consiguiente se rezaga con respecto a los cambios de sentido del campo eléctrico. Cuando éste tiene su máxima intensidad, apuntado, por ejemplo, hacia arriba, la polarización puede ser aún baja y mantener su crecimiento cuando el campo disminuye. Este retardo indica que el agua absorbe energía del campo.

Los hornos de microondas trabajan a una frecuencia inferior a la correspondiente a la máxima absorción. La razón es que el usuario desea calentar el interior de los alimentos. Si la frecuencia fuera la óptima para conseguir la máxima velocidad de calentamiento, las microondas se absorberían en las zonas externas del alimento y penetrarían sólo una corta distancia. Con una frecuencia menor, pongamos 2,45 gigahertz, mejora la penetración. Hay hornos que trabajan a 0,915 gigahertz, y así la penetración es aún mayor.

Pese a su claridad, la solución matemática de Debye no explica de qué manera concreta se transfiere la energía desde las microondas hacia el movimiento estocástico de las moléculas. Debye propuso un modelo sencillo, que será nuestra segunda hipótesis. Supongamos esférica la molécula de agua. Cuando esa esfera gire por efecto del campo eléctrico de una microonda, el agua que la rodea le opondrá una resistencia viscosa. Esa resistencia sólo adquiere importancia a las frecuencias de las microondas. A frecuencias inferiores, la rotación es demasiado lenta para que encuentre resistencia. A frecuencias superiores, no hay rotación alguna.

A las frecuencias de las microondas, la esfera gira lo bastante rápido para que la resistencia se oponga al giro y requiera del campo un aporte adicional de energía. Esa es la energía que pasa al movimiento aleatorio de las moléculas que circundan la esfera, elevando la temperatura. La manera exacta en que la esfera sufre una resistencia viscosa y transfiere energía a las moléculas vecinas no se conocía en tiempos de Debye y sigue ignorada en sus pormenores. Cabe una explicación sencilla. Supongamos que la esfera se halle inicialmente en cierto estado de equilibrio transitorio con las fuerzas eléctricas que ejercen las moléculas vecinas. Entonces, la esfera, para girar, debe desbaratar el equilibrio y desplazar las moléculas, con lo que aumentará la energía del movimiento aleatorio de éstas.

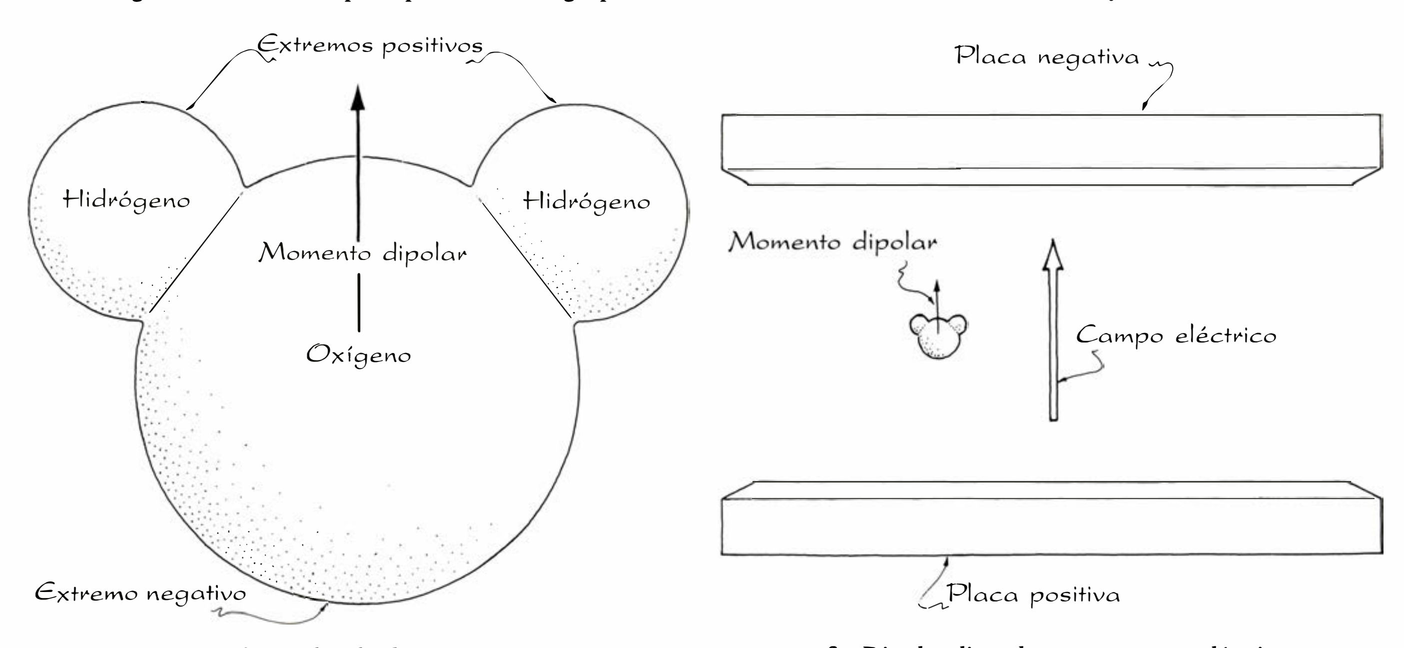
Pese a su tosquedad, este sencillo modelo de Debye sorprende por la exactitud con que predice la frecuencia a la cual es máxima la velocidad de absorción. Debye supuso que la molécula tenía un radio de 2×10^{-10} metros y que la viscosidad que encuentra es la del agua corriente. Con este modelo, calculó que el tiempo de respuesta debía ser del orden de $2{,}5 \times 10^{-11}$ segundos. Como la frecuencia a la cual alcanza su máximo la velocidad de absorción es, aproximadamente, el inverso del tiempo de respuesta, aquélla debería ser de unos 40 gigahertz, que se acomoda bastante bien al modelo.

Para explicar el calentamiento del agua por las microondas se propuso posteriormente otro modelo más elaborado. Constituye nuestra tercera hipótesis. El agua está formada por moléculas singulares y por numerosos grupos de moléculas de corta duración. Estos grupos se mantienen unidos a través de enlaces de hidrógeno, en los cuales los extremos hidrogénicos de una molécula son atraídos hacia el oxígeno de otra molécula. Cada vez que dos o más moléculas forman un grupo, disminuye su energía potencial eléctrica. Esa diferencia de energía se cede a la energía cinética del movimiento aleatorio del grupo. Pero la temperatura no sube porque, por término medio, el número de grupos que se establecen iguala al de grupos que se deshacen en las colisiones del movimiento estadístico, sin que éste gane energía neta alguna.

Una microonda añade energía al movimiento aleatorio si los momentos de giro a que somete las moléculas rompen algunos de los enlaces hidrogénicos de los grupos. (La energía para romper esos enlaces la proporciona el campo eléctrico.) Entonces, cuando una molécula liberada vuelve a formar un enlace hidrogénico con un grupo, la disminución de energía potencial pasa al movimiento estocástico del grupo molecular.

¿Cuál de los distintos grupos podría ser susceptible de romperse del modo descrito? Las moléculas individuales no cuentan, porque el momento de giro no necesita romper un enlace para hacer que la molécula gire. Tampoco es probable que participen los grupos de dos moléculas, porque cada una de ellas puede girar en torno al enlace hidrogénico que las mantiene unidas, sin que se rompa el enlace. Por su parte, es poco factible la contribución de los grupos de cuatro moléculas o más, ya que ello implicaría la ruptura de varios enlaces.

Nuestro mejor candidato lo tenemos



2. Molécula de agua

3. Dipolo alineado en un campo eléctrico

en el grupo de tres moléculas dispuestas de la manera especial que se muestra en la figura 8. En ésta, la molécula central está unida a la segunda molécula a través de uno de sus extremos hidrogénicos. Su otro extremo hidrogénico está libre. Al extremo oxigénico de la molécula central está unida la tercera molécula, mediante uno de sus extremos hidrogénicos.

Es importante la posición del engarce. Los cálculos indican que hay dos lugares en el extremo oxigénico de la molécula central donde la fijación en ellos haría disminuir al máximo la energía potencial. Por tanto, la fijación en otros lugares es menos probable. Por ejemplo, no es probable una fijación junto al extremo hidrogénico libre de la molécula central, porque ese extremo repelería la punta hidrogénica de la tercera molécula.

La acción del momento de giro debido al campo eléctrico de la microonda sobre la molécula central podría ser lo bastante intensa como para romper el enlace hidrogénico con la tercera molécula. Entonces, habiendo rotado la molécula central, la tercera podría restablecer su enlace hidrogénico en el otro punto de baja energía del extremo oxigénico de la molécula central. Este proceso introduce energía en el movimiento estocástico del grupo. La energía para romper el enlace hidrogénico inicial la aporta el campo eléctrico. Y cuando se restablece el enlace, la energía se convierte en energía cinética del grupo. Sería así como la energía de la microonda acabaría convirtiéndose en calor.

Hasta aquí, las hipótesis acerca del modo en que el agua de los alimentos absorbe rápidamente la energía de las microondas. Pasemos ahora a ocuparnos de otras cosas que ocurren en los hornos de microondas.

La presencia de cloruro de sodio en el agua acelera el calentamiento. La sal se disocia en iones sodio positivos e iones cloro negativos. Los iones positivos están rodeados de hasta cuatro moléculas de agua y los negativos de hasta siete. En todos los casos, el extremo, positivo o negativo, de una molécula de agua se ve atraído eléctricamente hacia el ion cargado. El campo eléctrico de la microonda arrastra esos iones hidratados a través del agua, llevando los iones sodio en el sentido del campo y los iones cloro en sentido contrario. Entonces, cada vez que los iones hidratados colisionan con moléculas de agua, se transfiere energía a éstas y el agua se calienta.

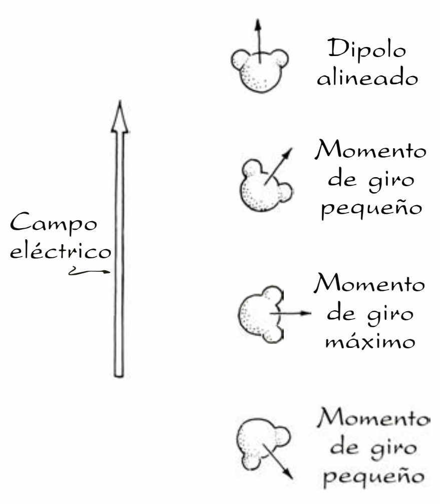
Las moléculas de agua trabadas en la estructura cristalina del hielo no pueden absorber energía de las microondas, pues están inmóviles. Si es así, ¿cómo es posible que un horno de microondas funda el hielo o descongele alimentos? La respuesta radica en que las sustancias no están completamente congeladas. En efecto, a los pocos segundos de sacar un cubo de hielo del congelador, su superficie comienza a fundirse. Entonces, si lo metemos en un horno de microondas, la capa líquida exterior absorberá las microondas, se calentará y fundirá el hielo.

Asimismo, los alimentos congelados expuestos al aire pueden estar cubiertos de una capa líquida. Se funden ahí y en numerosos puntos interiores donde el agua sea líquida. Entonces, si se exponen a microondas, esas bolsas se calientan rápidamente y, conforme se deshielan sus proximidades, el agua nueva comienza a absorber aún más energía de las microondas. Esta situación recibe el nombre de calentamiento descontrolado. Para evitarla, el alimento debe descongelarse a baja potencia, o bien ser expuesto a altas potencias sólo periódicamente, al objeto de que el calor penetre en las zonas congeladas por conducción, con lo que la descongelación será más uniforme.

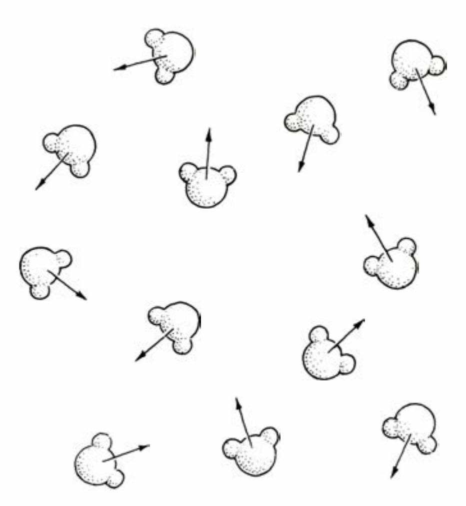
En las cocciones tradicionales, el alimento se mantiene en un entorno caliente para que el calor pueda trasladarse desde el exterior hasta el interior, por conducción o convección. Cuando se prepara un asado de carne de esta manera, el medio circundante puede alcanzar los 170 grados, temperatura bastante superior a la de ebullición del agua. El interior probablemente no alcance nunca una temperatura superior a los 70 u 80 grados. A esa temperatura, el pigmento mioglobínico de la carne pasa a oximioglobina, de un rojo vivo. Mientras, la superficie de la carne se calienta tanto que su oximioglobina se desnaturaliza, tornándose marrón. La elevada temperatura cambia, además, el sabor y el aroma de la superficie de la carne.

Cuando se cocina una carne en un horno de microondas, el agua calienta la sustancia sólida. Su superficie no rebasa nunca los 100 grados, punto de ebullición del agua. Como esa temperatura no es suficientemente alta para la desnaturalización completa de la oximioglobina, la superficie no llega nunca a ponerse marrón oscuro. Por otra parte, la vianda no desarrolla nunca el sabor y aroma de la carne cocinada en un horno clásico.

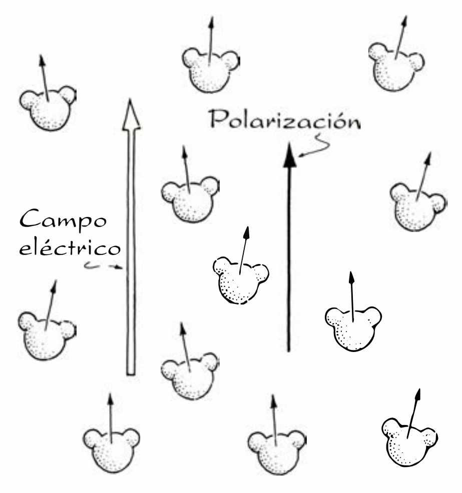
Si la pieza es poco gruesa, todo su interior se cuece por absorción directa de microondas. Si es gruesa, como suele ocurrir con los asados, las microondas se absorben antes de que lleguen al centro. A éste arriba el calor por conducción, desde la zona calentada directamente por la radiación. Entonces, como la conducción necesita



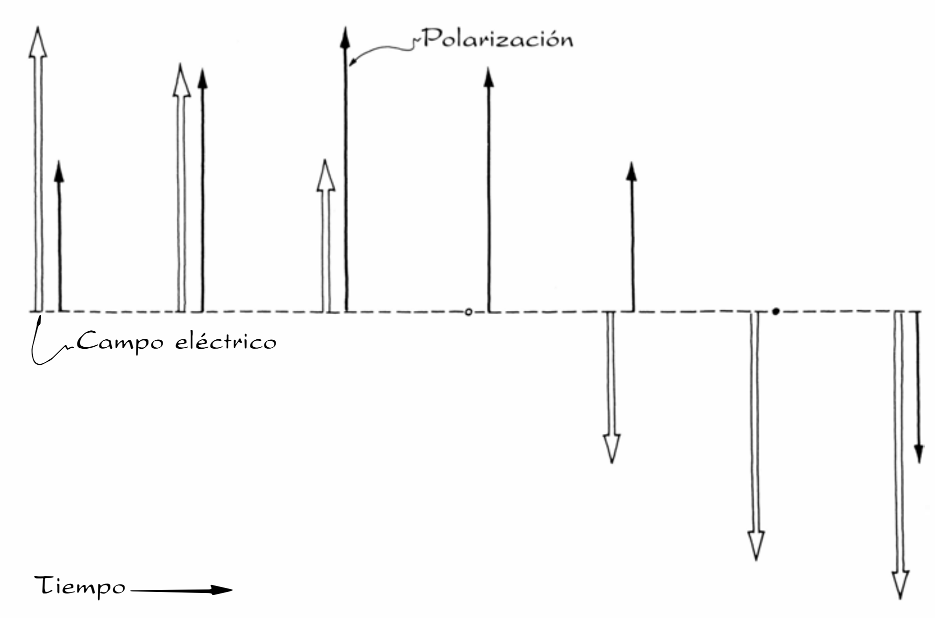
4. Actuación de momentos de giro actuando en dipolos



5. Dipolos de agua orientados al azar



6. Dipolos alineados



7. Desfase de la polarización con respecto a un campo eléctrico

tiempo, una gran pieza de asado tendrá que dejarse reposar tras haberse calentado en un horno de microondas.

Las microondas calientan el agua a tal velocidad que el vapor puede plantear algún problema. Así, al calentar un huevo, o incluso una yema no reventada, con microondas, la rápida producción de vapor interior puede hacer que estalle. Cuando se cuece un alimento encerrado en un envase, debemos dejarle una vía de escape para el vapor. Por esta causa, si se cocinan saquetes de plástico, hay que henderlos por arriba.

Hay varias razones para no emplear recipientes metálicos al cocinar con microondas. El metal refleja la radiación, apantallando así al alimento y retornando, posiblemente, al emisor de las microondas una energía suficiente para sobrecargarlo. Además, el metal conduce la electricidad, con lo que saltarán chispas entre el recipiente y la base o las paredes del horno. Tal como pude comprobar accidentalmente, hasta una vuelta de alambre que cierre un saquete de plástico puede producir chispas nada tranquilizadoras si se encuentra cercano a la base del horno. A veces, para proteger ciertas partes de un ave que puedan requemarse, se emplea papel de aluminio. Ese papel no resulta peligroso si no es excesivo y si se mantiene al menos a varios centímetros de la base y de las paredes del horno. Los recipientes que acostumbran a recomendarse para cocinar con microondas son de plástico o vidrio. Los materiales que contienen absorben poco o nada las microondas; y, si se calientan, lo hacen por conducción desde el alimento. Los recipientes absorben a veces una pequeña fracción de la energía de la radiación, lo que contribuye a calentar el alimento.

En 1986, Robert E. Apfel, y Richard L. Day, de la Universidad de Yale, hicieron notar que, cuando se calienta en un horno de microondas un recipiente de vidrio lleno de agua, ésta puede sobrecalentarse hasta los 110 grados, sin mostrar señales de ebullición. El agua del centro del recipiente se calienta a una celeridad tal que la convección hasta la superficie superior y la vaporización subsiguiente resultan insuficientes para evitar el sobrecalentamiento. En el agua más fría, situada junto a los costados del recipiente, no se forman burbujas de vapor, debido, en parte, a que el recipiente no absorbe las microondas y conduce el calor procedente del agua. Si en ese agua sobrecalentada se dejara caer un cubo de hielo, se formarían en seguida burbujas de vapor en las abundantes grietas microscópicas de la superficie del mismo. Así, el cubo proseguiría desencadenando la ebullición hasta que la temperatura del agua circundante cayera hasta unos 102 grados.

He estudiado un ejemplo similar de recalentamiento llenando parcialmente de agua un vaso de laboratorio de vidrio y vertiendo seguidamente una capa de aceite de maíz sobre el agua. Cuando ésta se sobrecalentó, se formaron burbujas de vapor en los costados del vidrio y luego se abrieron paso a través del aceite. En uno de mis ensayos, el agua se sobrecalentó de tal manera que ella y el aceite se esparcieron por todo el horno a causa de la rápida y masiva vaporización de la primera. Unos leves estallidos similares pueden oírse cuando la grasa que suelta la carne asada se acumula encima del agua encerrada en la bandeja del horno. Para evitar esos inconvenientes, tomo la precaución de guardar la carne en un saquete de plástico que previamente he hendido en varios puntos.

Apfel y Day observaron asimismo que una cuchara puede instar la ebullición en el agua sobrecalentada. Anthony E. Siegman, de la Universidad de Stanford, ya me había escrito acerca de este fenómeno. Anthony Parsons, de la Universidad de York, advirtió hace poco que añadiendo polvo al agua sobrecalentada se obtiene una ebullición tan rápida que el contenido puede desbordar del recipiente.

8. Rotación de una molécula dentro de un grupo

9. Fuerzas sobre los iones hidratados

Libros

Arqueología, conducta, revoluciones, paleopatología y teoría de los cuantos

Domingo Fletcher, Andrés de Haro, Luis Alonso, Francesc Bujosa y Emilio Santos

GRAN ATLAS DE ARQUEOLOGÍA. Editorial S.A. Ebrisa; Barcelona, 1986. Es la versión española de la edición francesa de *Le Grand Atlas d'Archeologie*, publicado en 1985 por la *Encyclopedia Universalis*. La obra consta de 17 capítulos, de desigual extensión, que a su vez se desglosan en 185 apartados, redactados por 96 especialistas, referentes a diversos y desconexos aspectos arqueológicos en el tiempo y el espacio, quedando sin tocar cuestiones del mayor interés; la extensión del libro quizá justifique estas lagunas y ella misma nos impide un detallado comentario de su contenido, limitándonos a destacar algunos aspectos.

En el *Prefacio*, Roland Martin nos explica que "no es ni un libro de arte ni la exposición sistemática de uno o varios métodos". La arqueología ha experimentado un cambio en su concepción y contenido, lo que permite hablar de una "nueva arqueología", que, en definitiva, busca desentrañar el funcionamiento de las comunidades humanas. Justifica el interés por esta ciencia la aparente uniformidad del mundo moderno, que hace a los hombres del siglo XX cada vez más preocupados por su "identidad cultural y sus raíces".

René Genouvés, en un amplio estudio, *La Arqueología y el Hombre*, expone el ámbito de la arqueología que, actualmente, abarca la totalidad de las culturas a través de todos los tiempos y regiones del mundo y de toda clase de restos hasta del presente siglo, siempre que estén fuera de uso. La finalidad es valorar los restos exhumados para conocer las relaciones de los hombres entre sí y su entorno. En las nuevas técnicas destaca la automatización de los datos, con la *Arqueografía*, o transposición del objeto a su imagen lingüística, y la *Arqueometría*, con la utilización de valores numéricos; pero, a pesar de los múltiples medios de investigación, siguen siendo imprescindibles la sensibilidad y el "ojo clínico" del excavador.

A lo largo de toda la obra, los autores consideran el final de la segunda guerra mundial como el punto de partida renovador de la arqueología, relegándose a un segundo plano las investigaciones precedentes, de las que de ninguna manera puede prescindirse por ser el necesario antecedente en que fundamentar las actuales.

El primer capítulo, *La Europa Prehistórica*, está dividido en tres apartados: *Paleolítico, Mesolítico; Neolítico* y *La Protohistoria*, iniciándose cada uno de ellos con una visión de conjunto, para continuar con 22 temas inconexos, quedando sin abordar algunas cuestiones de interés, al menos para el lector español, tales como las puntas solutrenses de pedúnculo y aletas del Parpalló, desconocidas en el resto de la Europa paleolítica, o los miles de losetas pintadas y grabadas de este mismo yacimiento; la nula atención prestada al arte rupestre levantino; el no citar el gran complejo del vaso campaniforme, ni las construcciones megalíticas andaluzas, ni el problemático Tartessos, ni los tesoros de El Carambolo y Villena, todos ellos temas de primer orden en el estudio de la arqueología europea.

El capítulo segundo, dedicado al *Mundo Clásico*, se inicia con una puesta al día de la investigación, y dos apartados, *El Mundo Griego* y *El Mundo Romano*, subdivididos en 16 artículos monográficos, sin referencias a la Península Ibérica, y faltos de profundidad algunos de ellos; se prescinde de la cultura ibérica, de tan destacada personalidad, y sólo se señala la posible relación de su lengua con la vasca.

La Alta Edad Media constituye el tercer capítulo del libro. Su estudio, con un preámbulo y ocho temas monográficos, está dedicado a los siglos V a X y al territorio de la Europa Central. Una segunda parte, *La Edad Media*, aborda, en siete apartados, cuestiones varias: la aldea, fortificaciones, edificios religiosos, etcétera, superficialmente tratadas.

El estudio del *Mundo Bizantino*, capítulo quinto de la obra, se divide en seis apartados, sin que en ningún momento se haga referencia al episodio bizantino español.

El capítulo sexto se dedica al *Mundo Islámico*, con una introducción y siete temas, redactados por M. Terrasse, estudioso de la arqueología hispanomusulmana, lo que explica una mayor atención hacia la Península Ibérica, con cita de lugares, monumentos, la cerámica de reflejos metálicos que se mantiene en Manises y Paterna hasta mucho después de la conquista de Granada, etcétera. Pero es inexplicable que, al hablar de técnicas hidráulicas en el mundo islámico, no se haga mención del sistema de riegos de la huerta de Valencia ni de su estructura jurídica bajo la dominación islámica.

De nuevo se vuelve a la Antigüedad con el estudio del *Próximo Oriente*, dividido en *Próximo Oriente Prehistórico* y *Próximo Oriente Antiguo*, y ambos, a su vez, en 5 y 10 apartados, todos del mayor interés para el lector español puesto que se estudian las primeras grandes culturas que alcanzaron nuestras costas. Es un buen resumen sobre métodos de trabajo, excavaciones, resultados obtenidos, tales como señalar que a partir de hacia 150.000 a. C. se produce la transición del Paleolítico Inferior al Medio, que a fines de éste aparece en Palestina el *Homo sapiens sapiens*, que el Paleolítico Superior se desarrolla a partir del 40.000 a. C., y la aparición, a fines del Pleistoceno, de las formas geométricas líticas, características del Natufiense (16.000/8.000), todo ello en evolución paralela al Epipaleolítico-Mesolítico del litoral mediterráneo español. El inicio de los cereales se sitúa a partir del VIII milenio y la agricultura se difunde hacia la cuenca del Mediterráneo y Europa a partir del VI milenio.

Los capítulos 8 a 13 (*Egipto y Sudán, Escitas, Asia Central, Mundo Indio, El Sudeste Asiático, Extremo Oriente,* con *China, Vietnam, Corea* y *Japón*) se leen con agrado por su clara exposición y contenido, de gran interés tanto para el lector no especializado como para el estudioso. En el capítulo 14 se vuelve sobre *Africa*, para informarnos de los importantes descubrimientos antropológicos que sitúan la aparición del hombre hace 3.500.000 años.

El capítulo dedicado a *América* se subdivide en *América del Norte, Mesoamérica* y *América del Sur*, con aportación de datos antropométricos, biológicos, genéticos, lingüísticos, etcétera, referentes a las poblaciones de

Asia y América, en apoyo del origen asiático de los amerindios, esquimales y aleutianos. Parece ser que a partir de un fondo mongoloide comenzaron a diferenciarse en Siberia hace algo menos de 20.000 años, separándose los esquimales y aleutianos sólo hace 9000 años. El camino de entrada en el continente americano sería el estrecho de Bering, rechazándose la posibilidad de las comunicaciones atlánticas, tesis que tan brillantemente defendiera el profesor Alcina Franch, con abundantes testimonios, en 1960. El conjunto es una amplia visión de los orígenes y desarrollo de las culturas indígenas americanas, aunque en ocasiones nada se mejora la excelente síntesis *La América Indígena*, escrita el año 1936 por el Dr. Pericot.

La siempre atrayente *Oceanía* plantea en su introducción el origen de los polinesios, a quienes se considera procedentes de Asia en tiempos en que los períodos glaciares facilitaban las comunicaciones. Hace 45.000 años pudo llegarse al continente de Sahul (Australia, Nueva Guinea y Tasmania). En cuanto a la tesis del origen americano de los polinesios, formulada de antiguo y renacida con la expedición de la Kon-Tiki, es rechazada, pues "la hipótesis de un origen asiático actualmente está confirmada por los resultados de la arqueología".

El último capítulo se ocupa de los *Tiempos Modernos*. En sus tres primeros apartados se habla de castillos europeos, arqueología de los intercambios culturales entre Asia y Europa y de las colonizaciones europeas en América del Norte, citándose las 21 misiones españolas en California, destacando que tanto para el estudio de éstas como para el de las inglesas y francesas "la excavación es la única fuente documental susceptible de proporcionar información". El cuarto apartado está consagrado a la *Arqueología Industrial*, denominación que ha suscitado vivas controversias, pero lo que en realidad expresa es el método de investigación, es decir, descubrir vestigios con técnica arqueológica y hacerlos legibles, teniendo siempre presente que "la información de la documentación escrita y figurada supera en mucho a la procedente del estudio de edificios y objetos". Debemos, pues, ver en la *Arqueología Industrial* "un método de investigación distinto de la investigación documental, pero siempre asociado a ella".

Las páginas finales van destinadas a *Bibliografía*, agrupada por los temas estudiados en el libro; *Glosario-Indice*, en donde se amplían datos de las cuestiones tratadas en el texto, y nombres de investigadores con ellos relacionados, y el *Indice de Autores* que intervienen, en número de 96, en la redacción de preámbulos y apartados de los diversos capítulos.

Hubiésemos deseado comentar con más minuciosidad tan importante obra, pero ello es prácticamente imposible dada su extensión. En un libro de esta amplitud es preciso excluir, tanto por el comentarista como por los autores, cuestiones transcendentales. No obstante, creemos que no debió pasarse por alto la cita de yacimientos y autores españoles, básicos para una visión más amplia de importantes etapas de la cultura universal. Con estas omisiones se da la impresión de que aquí no se ha hecho nada o casi nada en el campo de la investigación arqueológica e histórica.

En resumen, el libro está básicamente orientado hacia un público culto que guste de adentrarse en el campo de la arqueología, pero también para el especialista que quiera conocer el estado actual de estos estudios en cualquier lugar y fecha, o desee confirmar algún extremo de sus investigaciones, ya que la obra abunda en datos y fuentes bibliográficas puestas al día.

Destaquemos, finalmente, la magnífica presentación del libro, de cuidada impresión y enriquecido con abundante parte gráfica, lo que, con el indudable interés de su contenido, hacen de este *Gran Atlas de Arqueología* una bella obra digna de figurar en una selecta biblioteca. (D. F.)

COMPORTAMIENTO ANIMAL. Selección e introducciones de Joandomènec Ros. Libros Investigación y Ciencia; Barcelona, 1986. Este nuevo libro de *Investigación y Ciencia* representa una exposición atractiva de los temas actuales de la investigación etológica. La etología es una ciencia reciente, con una bibliografía nutrida y creciente que hacen necesario, de vez en cuando, una parada en su camino lleno de resultados apasionantes y preguntarse hacia dónde va y qué cuerpo de doctrina va sustentando y orientando su andadura. Este libro tiene esa intención, proporcionar una visión panorámica de los logros de la etología, haciéndolos llegar a un público que se interesa por los resultados que ofrece esta ciencia, sabiendo que allende el comportamiento animal está la conducta problemática y desconocida de la especie humana.

El libro recoge artículos seleccionados por el profesor Joandomènec Ros, catedrático de la Universidad de Barcelona, quien acertadamente destaca los puntos fundamentales de la investigación etológica. A modo de introducción se presenta un artículo de Maynard Smith sobre un aspecto básico de la metodología etológica: la evolución de la conducta. Es ésta una de las bases de la investigación, y parte del hecho de que las formas de conducta están sujetas a la herencia y a la selección natural, fenómenos biológicos que dirigen el quehacer animal y humano y que posibilita que la etología sea una ciencia biológica. Maynard Smith trata el problema del altruismo, un acto que realiza un animal y que aumenta la eficacia del que lo recibe, en detrimento aparente de la propia eficacia del que lo realiza. El parentesco genético es la explicación básica del comportamiento altruista, idea ampliada con la noción de altruismo recíproco para explicar los casos de altruismo entre individuos no emparentados, como ocurre en la cooperación en papiones machos. Se supone aquí que los individuos pueden reconocer a otros individuos y recordar su comportamiento pasado, pues los individuos macho que acudían con más frecuencia a las demandas de ayuda recibían asimismo auxilio con mayor frecuencia; los machos tendían también a solicitar la ayuda de determinados compañeros que, a su vez, eran los que demandaban su auxilio. La cuestión del altruismo es una de las cuestiones más sugerentes, y por otra parte problemáticas, de la etología.

Otro aspecto relacionado con el altruismo es la evolución de las conductas ritualizadas en las luchas intraespecíficas. Los animales que pugnan por un recurso valioso (como la pareja, el territorio o la posición jerárquica) no siempre utilizan, de la manera más eficaz, las armas de que disponen. En lugar de herir o matar al contrincante, actúan según reglas convencionales, por ejemplo, amenazando o atacando partes no vulnerables. Se aplica la teoría de juegos, con un modelo matemático de combates animales para determinar qué estrategias serían las más favorecidas por la selección natural en los individuos.

La cuestión de las bases neurológicas de la memoria y del aprendizaje es uno de los apartados más interesante de la conducta animal. Ya Lorenz puso de manifiesto las relaciones entre las formas de conducta y las estructuras neuronales precisas. Al tema, objeto de intensa investigación hoy, se le consagra el capítulo segundo. Destacaría el ar-

tículo sobre el aprendizaje del caracol marino *Hermissenda*, en el que se exponen las redes neuronales que intervienen en los fenómenos de asociación. También es un buen ejemplo de capacidad de memoria el de las aves que esconden semillas en épocas de abundancia para recuperarlas en épocas de escasez, recordando durante meses la localización de miles de escondrijos.

El capítulo tercero, sobre la fisiología del comportamiento, expone diversos mecanismos; entre ellos, el control hormonal, en el que se evidencia la interacción del cerebro y glándulas sexuales durante la conducta reproductora de machos y hembras en el lagarto verde *Anolis carolinensis*.

Las relaciones intraespecíficas configuran el capítulo cuarto, que representa un nivel superior de integración conductual. Aquí se traen a examen varios ejemplos de conductas puestas al servicio de la comunicación, como los apéndices de los escarabajos cornudos, la presa ofrecida por machos del insecto *Hylobittacus* a las hembras como ofrenda nupcial, el sistema de apareamiento de lek del gallo de las artemisas, la reproducción cooperativa del picamaderos de las bellotas, la fundación de una colmena y la estructura de los cardúmenes de peces. Ejemplos variados de la rica gama de la comunicación animal. El capítulo siguiente nos ofrece las relaciones interespecíficas, manifestadas a través de la defensa y del engaño.

El libro termina su incursión por el mundo animal con el estudio de la conducta social. El fenómeno social es un fenómeno raro, producido en pocos grupos animales, en los que hay cooperación y división del trabajo. Lo presentan los coyotes, que viven solos o en manada según las disposiciones alimentarias; los delfines, mamíferos adaptados a la vida marina, que tienen un gran cerebro y un rico repertorio vocal, aunque no queda clara su mayor capacidad de relación social que otros mamíferos. También se expone la compleja organización social de los macacos japoneses para llegar al comportamiento del chimpancé, uno de los primates más interesantes. La organización social de fusión-fisión, en la que la comunidad está continuamente agrupándose y fragmentándose, les confiere una gran capacidad de explotación del medio de que dependen; por no olvidarnos de la exogamia femenina: las hembras abandonan los grupos familiares para su reproducción.

Como punto final a esta excelente recopilación de artículos etológicos hubiera sido conveniente incluir alguno sobre la especie humana, aunque comprendemos que los estudios de este dominio de la etología no están tan desarrollados como debieran. En resumen, el libro comentado constituye una buena fuente de lectura e información sobre temas fundamentales de la investigación del comportamiento (A. H.)

REVOLUTION IN SCIENCE, por J. Bernard Cohen. The Belknap Press of Harvard University Press, 1985. Si ahora hace tres siglos Newton no hubiera escrito sus *Philosophiae naturalis principia mathematica*, Cohen los hubiera inventado y todo lo demás hubiera sido escolio. Porque incluso este libro, que viene a ser un diálogo in extenso del concepto de revolución científica introducido por Kuhn y su aplicación a distintos episodios de la historia del saber, no es más que una excusa para volver sobre Newton y su larga sombra.

Se ha escrito, a propósito de esta obra, que es el vino añejo del relato evangélico dejado para la madurez de la vida de este prohombre de la historia de la ciencia. (Algún purista le ha recriminado, en un rapto de máxima discrepancia, que revoluciones auténticas no existen en la ciencia; a lo más, profundas transformaciones.) La verdad es que se trata, ésa es la impresión, de un recorrido por los hitos principales del avance del conocimiento, trazado por un experto guía, que avisa de las encrucijadas y lleva a los mejores oteros. Deja las notas y el aparato bibliográfico para el final, que no entorpezcan el curso llano de la lectura.

Para quien está familiarizado con *The Revolution in Science, 1500-1750*, de A. Rupert Hall, el de Cohen es una continuación con énfasis en la noción de revolución y las cuatro notas distintivas de ésta (revolución intelectual, compromiso del que la propone con la misma, propagación a sus colegas y a las instituciones científicas y convencimiento de un número suficiente de expertos que acaban por adoptarla). En su opinión, cumplen esos requisitos, en el siglo XVIII, Lavoisier y Kant, sobre todo; en el XIX, Darwin, Faraday, Maxwell, Hertz y Freud; en el XX, la teoría cuántica, la relativista y la geológica (deriva continental y tectónica de placas). Siempre, principalmente, porque introduce oportunas implicaciones y convergencias con los movimientos sociales, económicos, epistemológicos y, menos, técnicos. En este último sentido, ¿por qué se olvida del microscopio, de los aceleradores de partículas?

Si dejamos de lado el uso del término y la conciencia de estar provocando una revolución, es evidente que el tratamiento que reciben los avances biológicos está en desventaja con el concedido a los físicos: la incorporación de las plantas del Nuevo Mundo y el conocimiento de la flora septentrional acabaría por apuntillar la botánica prerrenacentista; la sexualidad de las plantas transformó, dos siglos más tarde, la botánica renacentista; sin salirnos de esta parcela, la fisiología vegetal comienza realmente con el desentrañamiento de la función respiratoria. Por no hablar, en un sentido de mucho mayor alcance, de la teoría celular.

Otro sesgo del *more anglico* de hacer historia de la ciencia es el nulo relieve concedido a los científicos aquende los Alpes y los Pirineos. ¿Habrá que recordar la revolución de Redi con la que se alumbraba esa terra ignota que eran los seres inferiores? Justo es reconocerle, sin embargo, que recuerde la labor pionera en tareas de censura de la Reforma (p. 497). Quizá sea ése un primer paso para empezar a conocer mejor la losa de silencio caída sobre Vives, Huarte y Pereira, por ejemplo. (L. A.)

LA ENFERMEDAD EN LA PREHISTORIA. INTRODUCCIÓN A LA PALEOPATOLOGÍA, por Domingo Campillo. Salvat; Barcelona, 1983. Al revés del arte, la ciencia necesita muchas veces emprender lentos, largos y laboriosos caminos para conocer aspectos de la vida humana. Un buen ejemplo de lo que acabamos de decir son los estudios arqueológicos que, para poder entender lo que era el hombre y su cultura en períodos de los que no tenemos noticia, no dudan en examinar con toda minucia los restos de los utensilios que nuestros antepasados inventaron para poder hacer frente a la vida. Por eso resulta extraordinariamente paradójico que estos estudiosos del pasado remoto hayan despreciado sistemáticamente como material de estudio los restos de la propia especie humana que pueden aportar, parece obvio, importantes datos para confirmar o desmentir las hipótesis basadas en otro tipo de fuentes. Afortunadamente, desde hace pocas décadas el panorama ha cambiado, y ello se debe a una disciplina que, por el hecho de que su objetivo primordial fue conocer las enfermedades de nuestros antepasados remotos, se ha llamado paleopatología.

Nuestro país, que no puede considerarse afortunado en cuanto al número de cultivadores de esta disciplina,

sí lo puede hacer respecto a la calidad de su mejor —si no único— representante: el profesor Domingo Campillo, cuya actividad incansable permite que España figure en el pelotón de cabeza en cuanto a la producción de artículos sobre paleopatología. Lo que he dicho no debe entenderse como un elogio cariñoso de un amigo, sino como un dato, estrictamente objetivo y necesario para poder entender lo que el libro, *La enfermedad en la prehistoria*, es. Se trata, pues —quiero que quede claro—, de un texto que es una reflexión —un resumen, si se quiere— que un serio y apasionado especialista realiza acerca de una materia a la que ha dedicado muchos años y casi un centenar de artículos elaborados sobre fuentes originales.

Sólo teniendo en cuenta estos datos —que se trata de un profesional que está en el negocio— se entiende la estructura del libro. La obra empieza con dos magníficos capítulos dedicados, el primero, a la historia de la paleopatología y, el segundo, al material —huesos, fósiles, momias, siluetas, etcétera.— con que trabaja el paleopatólogo.

Les siguen otros dedicados a las malformaciones y afecciones congénitas, a las enfermedades infecciosas y parasitarias, a los tumores, a los procesos traumáticos, a la patología ósea y articular, a la paleoestomatología, a las enfermedades otorrinolaringológicas y, también, a las enfermedades de difícil detección. En todos estos capítulos Domingo Campillo ofrece un excelente resumen de la bibliografía existente sobre este tema y critica y matiza, con la ayuda de material propio, las principales conclusiones a las que se ha llegado en cada uno de los problemas. Los últimos capítulos están dedicados, por una parte, a la huella que la actividad médica o ritual prehistórica dejó sobre sus contemporáneos, y, por otra, a las representaciones que, en el arte rupestre o protohistórico, se encuentran de aspectos relacionados con la enfermedad o la medicina. Mención especial merece el capítulo consagrado al clásico tema de la trepanación craneal en el que el autor es una autoridad indiscutible. Un utilísimo glosario y una cuidada y seleccionada relación bibliográfica son los aspectos con que el libro concluye.

¿A quién puede interesar un libro como *La enfermedad en la prehistoria*? A mi modo de entender a numerosos y diversos grupos. En primer lugar, a aquellos que intentan reconstruir la vida del hombre en tiempos y en colectividades muy lejanos de la nuestra. ¿No es interesante y fundamental saber qué padecimientos físicos tuvieron nuestros antepasados? ¿No es necesario saber qué tipo de ayuda organizaron para asistir a los desvalidos? ¿Fue el hombre agresivo inter e intraespecíficamente? El segundo grupo es, en el sentido amplio, el que constituyen los biólogos. En la paleopatología encontrarán material e ideas acerca de las relaciones del hombre con las demás especies que forman su nicho ecológico, sobre lo que es la herencia, y, sobre todo, en el papel que las enfermedades han ocupado en la lucha por la supervivencia y en la selección de las especies.

También interesa, claro está, la paleopatología a los historiadores de la medicina. Mediante los resultados que les brinda esta disciplina se pueden objetivar los problemas reales que, en su afán de combatirlos, dieron origen al pensamiento médico. No menos interesante puede resultar la paleopatología al médico de hoy que quiera ser mínimamente crítico con su saber. Ella le ayudará a contestar cuestiones tales como si se puede hablar con rigor de "enfermedades nuevas", si hay, de verdad, enfermedades propias de la civilización, o cuáles eran —y son— las causas reales de las enfermedades. También encontrarán —encontrarían, quizá, que uno no tiene demasiada confianza— en el libro materiales para su meditación, aquellos que, airados por el estropicio que la industria, el urbanismo, el turismo o la propia agricultura causan a la naturaleza, reaccionan con justas protestas, pero cometiendo, en su arrebato, dos fraudes importantes. El primero es la consideración de lo natural como un espacio beatífico, donde el hombre ni encontró ni encontraría, si allí volviese, sufrimiento o dificultad alguna. Los resultados que ofrece Campillo no concuerdan, en absoluto, con esa imagen y, la verdad, uno siente muy poca envidia de estos antepasados nuestros que —y perdonen que yo también incurra, tal vez, en excesiva extrapolación— tuvieron que hacer frente a tan dolorosas enfermedades sin contar con el arsenal analgésico que tiene la medicina actual. El segundo de los fraudes consiste en presentar a la naturaleza como un conjunto estable y equilibrado. Si así fuera, ¿cómo se podría justificar o explicar, el hecho irrebatible de que fueron decenas de miles las especies que desaparecieron en tiempos anteriores no sólo a la civilización sino, incluso, a la propia especie humana?

Pero no quiero acabar sin reseñar una fascinante pregunta de carácter epistemológico que, como quien no quiere y disimulada bajo un estilo presuntamente positivista, nos lanza Domingo Campillo. Se trata de saber si la realidad sobre la que hemos construido nuestro "voluble" saber médico se ha mantenido invariable. Si, por ejemplo, cuando hablamos de sífilis, nos estamos refiriendo a la misma realidad, al mismo problema que existía en el siglo XVIII o XVI europeo, o en la América —aceptemos la incoherencia y el etnocentrismo que conlleva la expresión— precolombina. ¿Tuvieron nuestros antepasados algún sufrimiento, alguna enfermedad que, por no dejar huellas o por dejarlas distintas de las que nosotros esperamos encontrar, no conocemos?

Si alguna de las anteriores preguntas les interesa, acudan decididamente al libro de Domingo Campillo. Esta lectura les permitirá, si no contestarlas todas, sí, cuanto menos, formularlas mejor, lo cual, ya saben, es un paso fundamental para el progreso del conocimiento científico. (F. B.)

EL DEBATE DE LA TEORÍA CUÁNTICA, por Franco Selleri. Alianza Universidad; Madrid, 1986. La mecánica cuántica posee un formalismo matemático brillante y ha alcanzado un éxito espectacular en su contraste con los experimentos. Estas dos cualidades producen la "magia" de la mecánica cuántica, que cautiva a cuantos profundizan en su estudio. Pero la mecánica cuántica es también "mágica" en un sentido precientífico, en el que la palabra se aplica a lo que alcanza un objetivo sin que se encuentre a ello una explicación racional. La mecánica cuántica es, a la vez, la teoría más perfecta de la ciencia y la más irracional. No es, pues, extraño que haya dado lugar a un debate que dura ya sesenta años. El aspecto más conocido de ese debate fueron las discusiones entre Einstein y Bohr, iniciadas en 1927 y que no concluyeron hasta la muerte del primero en 1955. El punto culminante de esas discusiones fue un famoso artículo de Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) en 1935, contestado por Bohr unos meses más tarde. Fruto tardío de este artículo fueron las desigualdades descubiertas por Bell en 1965 y que han constituido el punto central de la epistemología de la física en los últimos veinte años.

Selleri, de la Universidad de Bari, estudia el debate de la mecánica cuántica desde tres puntos de vista: histó-

rico, filosófico y estrictamente científico. El tratamiento científico es, en muchos momentos, magistral, porque no es posible explicar mejor los aspectos técnicos sin hacer uso del complicado formalismo matemático de la mecánica cuántica. Así, el libro puede ser comprendido por los no especialistas, incluso los profanos en física. Sin embargo, el rigor del tratamiento es apto para dejar satisfechos a los más exigentes. Esto es cierto, sobre todo, en el estudio de la "paradoja" de EPR y las desigualdades de Bell. No en vano Selleri es un especialista en el tema.

Los aspectos históricos se desarrollan principalmente en el capítulo I, que contiene una biografía breve, pero ilustrativa, de los principales protagonistas en la creación de la mecánica cuántica, de Planck a Dirac. Ya aquí se trata de defender una de las tesis del autor: que el contexto social es elemento determinante en el desarrollo de las teorías científicas. O, más concretamente, que la mecánica cuántica ortodoxa aparece ligada a una filosofía idealista debido a que éste era el bagaje filosófico de hombres como Bohr y Heisenberg. La tesis tiene una dosis de verdad pero, en mi opinión, está algo exagerada en el libro. Ha sido el fracaso de todas las interpretaciones "realistas" el que ha llevado a la mayoría de los físicos actuales a aceptar la llamada "interpretación de Copenhague" creada por Bohr en 1927 y desarrollada después por él mismo, Heisenberg y otros. Por otra parte, la interpretación de Copenhague, más que idealista o incluso, positivista, habría de calificarse de pragmática.

Entramos así en los aspectos filosóficos, que están presentes a lo largo de todo el libro. El autor no se mantiene ecléctico, y ello es bueno porque el libro gana en interés. En más de una ocasión manifiesta sus claras preferencias por una filosofía materialista y trata de relacionar esta filosofía con las ideas de Einstein acerca de la mecánica cuántica, aun forzando los argumentos. Trata, incluso, de establecer una correlación entre la clase social originaria, alta o baja, de los creadores de la mecánica cuántica y su adhesión o rechazo de la interpretación de Copenhague.

Otro aspecto, éste de carácter científico, a propósito del cual el autor toma partido es el relativo a su aceptación del dualismo onda-corpúsculo en su forma más extrema, la de Louis de Broglie. Para él, tanto la luz como los electrones tienen dos elementos constituyentes, ondas y partículas, que se mueven juntos, aunque no siempre. A veces viaja sola la onda vacía (onda fantasma o "Gespensterfelder", como Einstein la llamó). Esto se nota sobre todo en el último capítulo, donde menciona un número de modelos desarrollados muy recientemente, a partir de 1984, para tratar de explicar de forma realista los experimentos (de Aspect y otros) que se supone habrían de decidir entre mecánica cuántica y las posibles alternativas realistas locales. En este punto el autor afirma —y con razón— que los experimentos realizados no refutan las teorías realistas locales.

En el capítulo primero (Los teóricos cuánticos y el mundo físico) se exponen los rasgos más salientes de la filosofía de cada autor. En el segundo (¿Es la mecánica cuántica una teoría completa?) se analizan las paradojas a que da lugar la hipótesis de completitud cuántica y se defiende la posibilidad de teorías de variables ocultas. En el tercero (La dualidad onda-corpúsculo) se estudian los experimentos que llevaron a la dualidad y se analizan posibles formas de entenderla (de Broglie, Schrödinger, Bohr, Fock, Heisenberg y Wigner). El capítulo cuarto, dedicado a la paradoja de Einstein, Podolsky y Rosen, comienza con el análisis de los criterios de realidad, localidad y completitud de estos autores, que constituyen el núcleo de la posición de Einstein frente a la mecánica cuántica. Se estudian con cierto detalle los estados de espín de un sistema de dos partículas, para llegar a las desigualdades de Bell, objeto del capítulo quinto (La separabilidad conduce a ciertas desigualdades). Finalmente, en el sexto (Filosofía experimental), además de presentar ciertos desarrollos recientes, principalmente del autor, se hace una revisión de las filosofías subyacentes en la interpretación de Copenhague y en sus alternativas.

El libro contiene un prefacio breve, pero sustancioso, del filósofo Karl Popper quien, según afirma, coincide con Selleri en "la búsqueda de la verdad y el trabajo continuado para mejorar nuestra comprensión de las teorías". El traductor, M. Ferrero, ha hecho un trabajo cuidadoso, añadiendo notas a pie de página siempre que el texto lo requería.

En resumen, un libro recomendable a todo el que sienta curiosidad por los problemas filosóficos de la mecánica cuántica o, más en general, por las interacciones entre ciencia y filosofía y los aspectos sociales de la ciencia. La edición en castellano incluye varias secciones nuevas, con desarrollos recientes. (E. S.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN EL PAISAJE

A THEORETICAL ANALYSIS OF GROUNDWATER FLOW IN SMALL DRAINAGE BASINS. J. A. Tóth en *Journal of Geophysical Research*, vol. 68, n.º 16, págs. 4795-4811; 1963.

BIOINDICADORES Y RELACIONES HIDROGEOQUÍMICAS EN EL ACUÍFERO DE MADRID. F. González Bernáldez, P. Herrera, C. Levassor, B. Peco y A. Sastre en *I Congreso de Geoquímica*. Colegio Nacional de Químicos. Soria, septiembre de 1985.

HACIA UNA SISTEMÁTICA DE LAS ZONAS HÚMEDAS DE CASTILLA-LA MANCHA. (RESUMEN). F. González Bernáldez en *Jornadas sobre las zonas húmedad de Castilla-La Mancha*. Consejería de Agricultura de Castilla-La Mancha. Cuenca, octubre de 1985.

EVAPORATIVE DISCHARGE FROM AQUIFERS. F. González Bernáldez, C. Pérez y A. Sterling en *Envirommental Management*. En prensa.

TRIDIMENSIONAL GROUNDWATER CHEMICAL AND ISOTOPIC VARIATIONS AS RELATED TO THE MADRID AQUIFER FLOW SYSTEM. A. Fernández Uría, J. Ch. Fontes, I. Herráez, M. R. Llamas y P. L. Rubio en *Estu. Geol.* En prensa.

EL MICROTUBULO, MOTOR INTRACELULAR

STUDIES ON THE MOTILITY OF THE FORAMINIFERA, II: THE DYNAMIC MICROTUBULAR CYTOSKELETON OF THE RETICULOPODIAL NETWORK OF *ALLOGROMIA LATICOLLARIS*. Jeffrey L. Travis, James F. X. Kenealy y Robert D. Allen en *The Journal of Cell Biology*, vol. 97, n.º 6, págs. 1668-1676; diciembre, 1983.

NEW OBSERVATIONS ON CELL ARCHITECTURE AND DYNAMICS BY VIDEO-ENHANCED CONTRAST OPTICAL MICROSCOPY. Robert Day Allen en *Annual Review of Biophysics and Biophysical Chemistry*, vol. 14, págs. 265-290.

GLIDING MOVEMENT OF AND BIDIRECTIONAL TRANSPORT ALONG SINGLE NATIVE MICROTUBULES FROM SQUID AXOPLASM: EVIDENCE FOR AN ACTIVE ROLE OF MICROTUBULES IN CYTOPLASMIC TRANSPORT. Robert Day Allen, Dieter G. Weiss, John H. Hayden, Douglas T. Brown, Hideshi Fujiwake y Marcia Simpson en *The Journal of Cell Biology*, vol. 100, n.º 5, págs. 1736-1752; mayo, 1985.

LOS PULSARES MAS ANTIGUOS DEL UNIVERSO

A NEW CLASS OF RADIO PULSARS. M. A. Alpar, A. F. Cheng, M. A. Ruderman y J. Shaham en *Nature*, vol. 300, n.º 5894, págs. 728-730; 16 de diciembre de 1982.

BLACK HOLES, WHITE DWARFS, AND NEUTRON STARS: THE PHYSICS OF COMPACT OBJECTS. Stuart L. Shapiro y Saul A. Teukolsky. John Wiley & Sons, Inc., 1983.

INTENSITY-DEPENDENT QUASI-PERIODIC OSCILLATIONS IN THE X-RAY FLUX OF GX5-1. M. van der Klis, F. Jansen, J. van Paradijs, W. H. G. Lewin, E. P. J. van den Heuvel, J. E. Trümper y M. Sztajno en *Nature*, vol. 316, n.º 6025, págs. 225-230; 18 de julio de 1985.

RECOMBINACION GENETICA

ROLES OF RECBC ENZYME AND CHI SITES IN HOMOLOGOUS RECOMBINATION. G. R. Smith, S. K. Amundsen, A. M. Chaudhury, K. C. Cheng, A. S. Ponticelli, C. M. Roberts, D. W. Schultz y A. F. Taylor en *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, vol. 49, págs. 485-495; 1984.

ROLES OF DOUBLE-STRAND BREAKS IN GENERALIZED GENETIC RECOMBINATION. F. W. Stahl en *Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology*, vol. 33, págs. 169-193; 1986.

ELECTRONES BALISTICOS EN SEMICONDUCTORES

DIRECT OBSERVATION OF BALLISTIC TRANSPORT IN GAAS. M. Heiblum, M. I. Nathan, D. C. Thomas y C. M. Knoedler en *Physical Review Letters*, vol. 55, n.º 20, págs. 2200-2203; 11 de noviembre de 1985.

THE QUEST FOR BALLISTIC ACTION. Trudy E. Bell en *IEEE Spectrum*, vol. 23, n.º 2, págs. 36-38; febrero, 1986.

BALLENAS Y MORSAS, LABRADORAS DEL FONDO MARINO

THE GRAY WHALE, *ESCHRICHTIUS ROBUSTUS* DIRIGIDO POR MARY LOU JONES, STEVEN L. SWARTZ Y STEPHEN LEATHERWOOD. ACADEMIC PRESS, 1984.

SIDE-SCAN SONAR ASSESSMENT OF GRAY WHALE FEEDING IN THE BERING SEA. Kirk R. Johnson y C. Hans Nelson en *Science*, vol. 225, n.º 4667, págs. 1150-1152; 14 de septiembre de 1984.

RENDIMIENTO DE LA MUJER CASADA EN LA INVESTIGACION

FAIR SCIENCE: WOMEN IN THE SCIENTIFIC COMMUNITY. Jonathan R. Cole. The Free Press, 1979.

CAREER OUTCOMES IN A MATCHED SAMPLE OF MEN AND WOMEN PH.D.S: AN ANALYTICAL REPORT. Nancy C. Ahern y Elizabeth L. Scott. National Academy Press, 1981.

THE PRODUCTIVITY PUZZLE: PERSPECTIVE AND CHANGE IN PATTERNS OF PUBLICATION OF MEN AND WOMEN SCIENTISTS. Jonathan R. Cole y Harriet Zuckerman en *Advances in Motivation and Achievement*, vol. 2, págs. 217;258; 1984.

EL ORDENADOR, INSTRUMENTO MUSICAL

THE TECHNOLOGY OF COMPUTER MUSIC. Max V. Mathews. The MIT Press, 1969.

LOS SONIDOS DE LA MÚSICA. John R. Pierce. Prensa Científica; Barcelona, 1985.

COMPUTER MUSIC. Charles Dodge y T. A. Jerse. Schirmer Books, 1985.

JUEGOS DE ORDENADOR

THE ORIGIN OF SPACEWAR. J. M. Graetz en *Creative Computing*, vol. 7, n.º 8, págs. 56-57; agosto, 1981.

WINNING WAYS FOR YOUR MATHEMATICAL PLAYS, VOL. 2: GAMES IN PARTICULAR. Elwyn R. Berlekamp, John H. Conway y Richard K. Guy. Academic Press, 1982.

MICROCOMPUTER DISPLAYS, GRAPHICS, AND ANIMATION. Bruce A. Artwick. Prentice-Hall, Inc., 1984.

TALLER Y LABORATORIO

AQUEOUS DIELECTRICS. J. B. Hasted. Chapman and Hall, 1973.

INITATING BOILING WITH ICE. Robert E. Apfel y Richard L. Day en *Nature*, vol. 321, n.º 6071, pág. 657; 12 de junio de 1986.